

Aus der
Universitätsklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde mit
Poliklinik Tübingen

**Quantitative Analyse von EKG-Parametern in
vokalisierenden Makaken**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde**

**der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen**

**vorgelegt von
Handke, Paula**

2026

Dekanin: Professorin Dr. S. Y. Brucker

1. Berichterstatter: Professor Dr. S. Hage
2. Berichterstatter: Professorin Dr. K. Herfert

Tag der Disputation: 01.10.2026

Für meine Eltern

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	Die Sprache	8
1.1.1	Evolution der Sprache.....	8
1.1.2	Anatomie und Physiologie des Kehlkopfs	9
1.1.3	Primaten als Modellsystem für Lautäußerungsuntersuchungen .	10
1.2	Das Herz	13
1.2.1	Physiologie des Herzens	13
1.2.2	Herzfrequenz	15
1.2.3	Das Elektrokardiogramm und seine Nomenklatur	15
1.3	Wissenschaftliche Zielsetzung der Arbeit.....	18
2	Methodik.....	19
2.1	Versuchsaufbau	19
2.2	Versuchsdurchführung	20
2.2.1	Materialien	20
2.2.2	Implantation des Telemetrie-Systems.....	21
2.2.3	Datenerhebung (Affengeräusche und EKG-Signale)	21
2.3	Datenauswertung	22
2.3.1	Zeitliche Synchronisation von Vokalisation und EKG-Signal	22
2.3.2	Ermittlung der EKG-Parameter	23
2.3.3	Statistische Auswertung der Messergebnisse	25
3	Ergebnisse	28
3.1	Herzfrequenz	28
3.2	P-Welle	30
3.3	PQ-Intervall	31
3.4	PQ-Strecke	33

3.5	QRS-Komplex	35
3.6	ST-Strecke	36
3.7	QT-Intervall	38
3.8	T-Welle.....	40
3.9	Geschlechter im Überblick	41
4	Diskussion	48
4.1	Methodendiskussion	48
4.2	Ergebnisdiskussion	50
4.2.1	Herzfrequenz	50
4.2.2	EKG-Parameter	52
4.2.3	Geschlechtereinfluss.....	55
4.3	Fazit und Ausblick.....	58
5	Zusammenfassung.....	60
6	Literaturverzeichnis	62
7	Erklärung zum Eigenanteil	67
8	Danksagung	68
9	Anhang.....	69
9.1	Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 1	69
9.2	Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 1	71
9.3	Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 2	73
9.4	Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 2	74
9.5	Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 3	75

9.6	Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 3	76
9.7	Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 4	77
9.8	Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 4	79
9.9	Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 5	81
9.10	Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 5	82
9.11	Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 6	83
9.12	Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 6	85
9.13	Grafische Gegenüberstellung der Herzfrequenz von Mittelwert, SEM und STD im Zeitintervall [-5;5]	87

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung eines Elektrokardiogramms	16
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Käfigs aus (Risueno-Segovia et al., 2022)	19
Abbildung 3: Exemplarisches EKG mit korrelierender Vokalisation (Risueno-Segovia et al., 2022)	22
Abbildung 4: Exemplarisches annotiertes EKG-Signal einer Messequenz....	24
Abbildung 5: Vergleich der Herzfrequenz je Affe vor und nach der Vokalisation	29
Abbildung 6: Vergleich der P-Welle je Affe vor und nach der Vokalisation.....	30

Abbildung 7: Vergleich des PQ-Intervalls je Affe vor und nach der Vokalisation	32
Abbildung 8: Vergleich der PQ-Strecke je Affe vor und nach der Vokalisation.	34
Abbildung 9: Vergleich des QRS-Komplexes je Affe vor und nach der Vokalisation	35
Abbildung 10: Vergleich der ST-Strecke je Affe vor und nach der Vokalisation	37
Abbildung 11: Vergleich des QT-Intervalls je Affe vor und nach der Vokalisation	39
Abbildung 12: Vergleich der T-Welle je Affe vor und nach der Vokalisation.....	40
Abbildung 13: Grafische Gegenüberstellung der Herzfrequenz von Mittelwert, SEM und STD im Zeitintervall [-5;5]	87
Abbildung 14: Grafische Gegenüberstellung der Herzfrequenz von Mittelwert, SEM und STD im Zeitintervall [-5;5]	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anzahl der gemessenen Laute pro Affe und Geschlecht.....	21
Tabelle 2: Überblick zu den p-Werten aller Affen	42
Tabelle 3: p-Werte je Geschlecht	43
Tabelle 4: Ergebnisse der zweifaktoriellen ART-ANOVA (mit Bonferroni-Korrektur)	44

Abkürzungsverzeichnis

EKG	Elektrokardiogramm
-----	--------------------

1 Einleitung

Im Folgenden werden die Grundlagen der vorliegenden Arbeit erläutert und der Stand des Wissens dargelegt. In Kapitel 1.1 wird die Evolution der Sprache beleuchtet und auf die Anatomie des Kehlkopfes eingegangen. Anschließend wird dargestellt, warum sich Makaken als Modellsystem zur Untersuchung von Lautäußerungen eignen. In Kapitel 1.2 wird die Physiologie des Herzens beschrieben sowie das Elektrokardiogramm mit seinen Parametern erklärt. Abgeschlossen wird das erste Kapitel mit der Zielsetzung der Arbeit.

1.1 Die Sprache

1.1.1 Evolution der Sprache

Sprache ist ein fundamentales Werkzeug der menschlichen Interaktion und spielt eine zentrale Rolle in der sozialen Kommunikation. Durch Sprache können Menschen Informationen austauschen, Themen debattieren, Vergangenes analysieren, Pläne für die Zukunft schmieden sowie Emotionen und Bewusstsein ausdrücken (Hage, 2024). Es ist unbekannt, wann Menschen erstmals begonnen haben miteinander zu sprechen (Jarvis, 2019). Was zu dieser Befähigung führte konnte bisher nicht herausgefunden werden. Neuste wissenschaftliche Erkenntnisse weisen jedoch darauf hin, dass die Sprachentwicklung des Menschen potenzielle evolutionäre Vorstufen beim nicht-menschlichen Primaten hat (Hage, 2024). Bisher nahm man an, anatomische Gegebenheiten – etwa die Morphologie von Kehlkopf und Oberkiefer – verhinderten die Produktion sprachähnlicher Laute bei Primaten (MacNeilage, 1998). Neuere Studien zeigen, dass bei Affen neuronale Mechanismen vorliegen, die der menschlichen sprachproduzierenden Gehirnstruktur ähneln (Hage & Nieder, 2016). Jorstad hebt zudem hervor, wie sich diese Hirnstrukturen kontinuierlich von Affenarten bis zum Menschen weiterentwickeln (Jorstad et al., 2023). Primaten haben neuroanatomische und neurophysiologische Strukturen, die durchaus auch zu einer Sprachentwicklung hätten führen können. Dieser evolutionäre Weg wurde nicht eingeschlagen, weil die Gruppengröße und die soziale Organisation der Affen die Entwicklung der Sprache nicht nötig machte (Raviv et al., 2020). Es war

vielmehr der evolutionäre Druck im sozialen menschlichen Umfeld, was zu einer Entwicklung der menschlichen Sprache führte (Hage, 2024).

Primaten sind ein geeignetes Tiermodell zur Untersuchung der Vorläufer menschlicher Sprache (Hage, 2024). Allerdings sind die physiologischen Abläufe von spontanen Lautäußerungen noch weitgehend unbekannt (Risueno-Segovia et al., 2022). Erste Untersuchungen zeigen, dass spontane Vokalisationen von Makaken unter anderem durch einen Anstieg der Herzfrequenz gekennzeichnet sind (Risueno-Segovia et al., 2022) und kardiorespiratorische Mechanismen Stimmverhalten vorhersagen und auslösen können.

1.1.2 Anatomie und Physiologie des Kehlkopfs

Der Kehlkopf (Larynx) ist ein knorpelig-muskuläres Verschlusssystem und bildet die Grenze zwischen Speise- und Atemwege (Aumüller et al., 2014). Seine Aufgabe besteht darin, die Lungenbelüftung zu regulieren und während des Schluckaktes zu schützen (Bowling et al., 2020). Außerdem besitzt er eine Phonationsfunktion durch die Stimmbildung und ist somit für die stimmliche Kommunikation verantwortlich (Aumüller et al., 2014; Bowling et al., 2020). Im Larynx selbst liegen zwei Stimmlippen, welche beim Vorbeiströmen von Atemluft vibrieren und somit Laute im Larynx bilden (Behrends et al., 2017). Die Stimmlippen werden durch Muskelzug, Körperhaltung und Atmung zusätzlich beeinflusst. Eine kontinuierliche Atmung ist damit für die Stimmbildung die Grundvoraussetzung und wird hauptsächlich durch das Zwerchfell sichergestellt. Bei geöffneten Stimmlippen schwingen diese nicht, weshalb keine Geräusche entstehen und lediglich die Atemfunktion im Vordergrund steht. Wenn die Stimmlippen geschlossen sind, beginnen diese beim Ausatmen zu schwingen. Dadurch entstehen die Töne, welche in den Resonanzräumen die Sprache bilden. Die Höhe der Töne wird physiologisch durch die Spannung der Stimmlippen bestimmt. Durch gesteigerten Druck beim Ausatmen werden die Töne lauter (Jiang et al., 2000).

Anatomisch lässt sich der Kehlkopf in drei Teile gliedern - den supra-, trans- und in den subglottischen Raum. Das Kehlkopfskelett besteht aus dem Kehildeckel, dem Ringknorpel, dem Schildknorpel und dem Stellknorpel, die über zwei Gelenke miteinander verbunden sind (Behrends et al., 2017).

Kehlköpfe von Primaten sind im Verhältnis zur Körpergröße deutlich größer als bei Karnivoren, zusätzlich variabler in der Größe und sie haben sich schneller entwickelt (Bowling et al., 2020). Affen sind in der Lage, stimmlose Laute zu bilden (Jarvis, 2019). Es wird in Frage gestellt, ob diese abgegebenen Laute bei einem Mangel an Kehlkopfbewegungen als richtige Rufe anzusehen sind. Dagegen spricht, dass das Lautbildungsorgan an verschiedene Kommunikationsanforderungen flexibel angepasst werden kann. Diese artikulatorische Flexibilität stützt die Hypothese einer stätigen Evolution des vokalen Verhaltens von Primaten (Hage, 2024).

Typische anatomische Kehlkopfstrukturen beim Primaten sind nach oben gerichtete Fortsätze der Stimmlippen. Diese sind beim Menschen verloren gegangen (Nishimura et al., 2022). Die Komplexität des Kehlkopfs beim Primaten war so eher hinderlich bei der Entwicklung der Phonation, sodass der Verlust der komplexeren anatomischen Strukturen beim Menschen von Vorteil war (Nishimura et al., 2022).

1.1.3 Primaten als Modellsystem für Lautäußerungsuntersuchungen

Vier Jahrzehnte lang ging man davon aus, dass nichtmenschliche Primaten durch die eingeschränkte Anatomie ihres Vokaltrakts, welcher oberhalb des Kehlkopfes liegt, unfähig sind, menschliche Sprachlaute zu erzeugen (Fitch et al., 2016). Laut Liao und Kollegen gibt es verschiedene Auffassungen zu Lautäußerungen von Primaten (Liao et al., 2018). Es gibt Forschungsgruppen, die davon ausgehen, dass Lautäußerungen mit den inneren Zuständen wie zum Beispiel dem Arousal gekoppelt sind und damit nicht mit der menschlichen Sprache zu vergleichen sind (Jürgens, 2009; Owren et al., 2011). Andere Wissenschaftler sind davon überzeugt, dass Primaten eine Stimmkontrolle, wie zum Beispiel Alarmrufe bei grünen Meerkatzen bei Anwesenheit von Raubtieren (Hage & Nieder, 2016; Schlenker et al., 2016), besitzen und dies gezielt einsetzen können (Liao et al., 2018).

Das Ergebnis interagierender kognitiver und autonomer Prozesse ist die Stimmproduktion (Borjon et al., 2016). Auch wenn es im Raum steht, dass die Lautäußerungen von Primaten durch die Veränderung in einem Erregungszustand, dem so genanntem Arousal, beeinflusst werden kann, weiß

man nur sehr wenig darüber, wie die Wahrscheinlichkeit und der Zeitpunkt von Lautäußerungen beeinflusst werden (Borjon et al., 2016). So lassen sich Herzschwankungen rund um eine Lautäußerung anhand der Atmung oder Bewegung der Tiere nicht vollständig vorhersagen. Außerdem hängt der Zeitpunkt der Stimmproduktion eng mit der Phase eines 0,1-Hz-Rhythmus des autonomen Nervensystems, die sogenannte Meyer-Welle, zusammen (Borjon et al., 2016). Laut Borjon zeigt eine Zusammenstellung des Zustandsraums der Erregungsdynamik während der Vokalisierung, dass Störungen des Ruhezustandsraums die Wahrscheinlichkeit erhöhen, dass eine Lautäußerung erfolgt.

In der Neurowissenschaft ist der Weißbüschelaffe (*Callithrix jacchus*) ein beliebtes Primatenmodell (Eliades & Miller, 2017; Miller et al., 2016; Mitchell et al., 2014) und er entwickelt sich zu einer Schlüsselfigur in der Neurobiologie, um die natürliche Stimmkommunikation von Primaten aufzuklären (Grijseels et al., 2023). Weißbüschelaffen sind in der Lage, Lautäußerungen mit einer verlängerten Dauer zu erzeugen (Pomberger et al., 2018). Sie sind fähig, Vokalisationen zu bestimmten Zeitpunkten zu unterbrechen, was durch das Auftreten von periodisch segmentierten Phee-Rufen unterstützt wird. Vokalisationen bestehen somit nicht aus einem einzigen diskreten Rufmuster, sondern setzen sich aus vielen nacheinander geäußerten Einheiten, wie die menschliche Sprache, zusammen (Pomberger et al., 2018).

Die Ähnlichkeiten mit der Anatomie und Physiologie des menschlichen Gehirns, wie der granuläre frontale Kortex, machen diese Affenart zu einem vielversprechenden neurodegenerativen und neuropsychiatrischen Modellsystem (Pomberger et al., 2019). Pomberger et al. können zeigen, dass Weißbüschelaffen auf willkürliche visuelle Hinweise Lautäußerungen machen können (Pomberger et al., 2019). Insgesamt kann dadurch gezeigt werden, dass sich der Weißbüschelaffe zur Untersuchung von komplexen motorischen Verhaltensweisen und ihrer kognitiven Kontrolle als Modell anbietet, da beide Aspekte der Sprache zugrunde liegen (Pomberger et al., 2019).

Ähnlich wie Menschen, besitzen Affen eine gewisse Hirnstruktur in den vorgelagerten kortikalen Regionen, die an der Wahrnehmung von Stimmsignalen

beteiligt sind (Grijseels et al., 2023). Hierbei ist das frontotemporale Netzwerk im Gehirn von Primaten für die Kommunikation von entscheidender Bedeutung (Rocchi et al., 2021).

Bei Affen wird die Vokalisation primär subkortikal gesteuert, insbesondere durch das periaquäduktale Grau (PAG) im Mittelhirn, welches emotionale Reaktionen und Lautäußerungen integriert (Dujardine, 2004). Beim Menschen übernehmen kortikale Regionen wie das Broca-Areal eine entscheidende Rolle in der willkürlichen Sprachproduktion (Hage & Nieder, 2013). Ein Unterschied liegt im *Fasciculus arcuatus*, einer Faserverbindung zwischen Broca- und Wernicke-Areal. Diese Verbindung ist beim Menschen deutlich ausgeprägter als bei nicht-menschlichen Primaten (Rilling et al., 2008). Gleichzeitig belegen elektrophysiologische Einzelzellaufnahmen aus der ventrolateralen präfrontalen Rinde, die als funktionelles Homolog zu Teilen des Broca-Areals angesehen wird, eine selektive neuronale Aktivierung kurz vor der bewussten Auslösung von Lautäußerungen. Diese Ergebnisse werden als Hinweis auf eine kortikale Beteiligung an der geplanten Vokalproduktion interpretiert (Hage & Nieder, 2013).

Affen, wie zum Beispiel Weißbüschelaffen, produzieren rhythmische Silben mit fester Dauer (ca. 100 ms), die als evolutionäre Vorläufer sprachlicher Einheiten gelten können (Pomberger et al., 2018). Während Affen grundlegende neuroanatomische Vorläufer des menschlichen Sprachnetzwerks besitzen, ermöglicht erst die beim Menschen ausgeprägte kortikale Kontrolle und Verschaltungsdichte die komplexe Sprachproduktion (Balezeau et al., 2020).

Der akustische Vokalraum ist laut Liebermann bei Rhesusaffen eingeschränkter als bei Menschen, da die Rachenregion nicht flexibel ist (Lieberman et al., 1969). Laut Fitch wiederum ist der Stimmapparat der Makaken fähig, eine ausreichende Bandbreite an Sprachlauten zu erzeugen, um die gesprochene menschliche Sprache zu unterstützen (Fitch et al., 2016). Für einen Makaken sind die bekannten Stoppkonsonanten (p, b, k und g) in Kombination mit weiteren Konsonanten (h, m, oder w) einfach zu erreichen (Fitch et al., 2016). Mittels neuer Röntgentechnik lassen sich entsprechende Untersuchungen durchführen, welche die neue These belegen. Vielmehr scheitert die Sprachfähigkeit an

mangelnden kognitiven Fähigkeiten der Tiere. Was das menschliche Gehirn dahingehend von den Makaken unterscheidet, muss noch untersucht werden (Fitch et al., 2016). Bei den Menschen hingegen entwickelte sich die Sprache eher durch neuronale Veränderungen anstatt durch Modifikationen der Stimmanatomie (Fitch et al., 2016).

1.2 Das Herz

1.2.1 Physiologie des Herzens

Anatomisch im Mediastinum gelegen ist das Herz der zentrale Bestandteil des Herz-Kreislaufsystems. Über zentrale und periphere Blutgefäße versorgt es alle Körperzellen mit Sauerstoff und transportiert wichtige Botenstoffe und Metabolite (Renz-Polster & Krautzig, 2013). Das Herz ist ein Hohlorgan im menschlichen Körper sowie bei allen Wirbeltieren. Es besteht zu einem großen Teil aus quergestreifter Muskulatur und verfügt über eine Automatik, welche es ermöglicht ohne externe Reize rhythmisch zu kontrahieren (Larsen, 2016). Die Kontraktion des Herzens wird durch elektrische Signale, das Aktionspotential, gesteuert. Dieses wird ausgehend vom Sinusknoten über das gesamte Organ geleitet. Das Aktionspotential kann durch das Elektrokardiogramm abgeleitet und visualisiert werden.

Anatomisch zeigt das menschliche Herz sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede mit dem des Affen. So ist beispielsweise bei Schimpansen und Gorillas der linke Ventrikel kugelförmig, dickwandig und hypertrabekuliert, um rasche Blutdruckanstiege während kurzen körperlichen Widerstandsaktivitäten zu kompensieren (Shave et al., 2019). Beim Menschen hingegen ist der linke Ventrikel länglich, dünnwandig und minimal trabekuliert (Shave et al., 2019), um wahrscheinlich die ventrikuläre Nachgiebigkeit zu optimieren (Halaney et al., 2017). Zusätzlich wird die diastolische Senkungsgeschwindigkeit verbessert, welche wiederum die ventrikuläre Füllung positiv beeinflusst (Shave et al., 2019). Wegen der ähnlichen Positionierung des Herzens bei Menschen und Affen im Thorax ist das EKG ebenfalls sehr ähnlich und gut zu vergleichen (Yamaoka et al., 2013). Es besteht vor allem eine Ähnlichkeit von der Abfolge der kardialen Repolarisation von Menschen und japanischen Makaken. Dadurch ist es möglich,

das Elektrokardiogramm und insbesondere die Repolarisationsprozesse zwischen den Spezies zu vergleichen (Imanishi et al., 1983).

Wie beim Menschen ist das Herz aus zwei Hauptkammern, den sogenannten Ventrikeln, mit jeweils einer vorgelagerten Kammer, dem Vorhof, aufgebaut (Rosa et al., 2012). Mechanisch gesteuert wird der Blutfluss durch die vier Herzklappen. Die Herzklappen gliedern sich in jeweils zwei Segel- und Taschenklappen: Die Mitral- und die Trikuspidalklappe trennen die Vorhöfe von den Ventrikeln, während die Pulmonal- und die Aortenklappe den Blutfluss aus den Ventrikeln in die großen abführenden Gefäße regulieren. Das Öffnen und Schließen der Klappen geschieht rein passiv durch sich ändernde Druckverhältnisse in Herz und Gefäßen. Die beiden blutabführenden Gefäße stellen den Beginn des Lungen- sowie des Körperkreislaufs dar. Für die Pumpleistung stellen die Vorhöfe nur eine geringe Unterstützung dar. Sie unterstützen das Befüllen der beiden Ventrikel. Diese Phase wird Diastole genannt und besteht aus zwei Phasen, der Entspannungsphase und der Füllungsphase (Aumüller et al., 2014). Durch die Kontraktion der Ventrikel wird das Blut schließlich in die Kreisläufe gepumpt. Dieser Vorgang wird Systole genannt. Sie ist unterteilt in zwei Phasen: isovolumetrische Kontraktion (Anspannungsphase) und Auswurfphase (Fukuta & Little, 2008). Die großen Gefäßausgänge und Gefäßeinmündungen sind ebenfalls bei manchen nicht-menschlichen Primaten vergleichbar ausgeprägt wie beim Menschen (Rosa et al., 2012).

Die Steuerung des Herzens erfolgt autonom über den Sinusknoten. Er gehört zum Erregungsleitungssystem des Herzens. Die Schrittmacherzellen sind spezialisierte Herzmuskelzellen, welche spontan depolarisieren und diese Impulse an die arbeitende Herzmuskulatur weitergeben. Diese elektrische Aktivität kann im EKG aufgezeichnet und ausgewertet werden (Gertsch et al., 2008). Das autonome Innervationsmuster des Herzens, sprich die sympathische und parasympathische Nervenversorgung und somit die Herzinervation, weist bei Affen eine ähnliche Grundorganisation wie beim Menschen auf. Es existieren parasympathische Vagusäste sowie sympathische kardiale Nerven vom Mittel- und unteren Hals- und Thoraxganglion (Kawashima et al., 2005).

1.2.2 Herzfrequenz

Die Herzfrequenz ist eine der wichtigsten physiologischen Parameter des Herzens. Sie wird in abgeschlossenen Herzaktionen bzw. Schlägen pro Minute (bpm) gemessen. Im physiologischen Zustand entspricht die Herzfrequenz dem Puls. Den größten Einfluss auf die Herzfrequenz hat die körperliche Belastung. Die Herzfrequenz beträgt bei einem Erwachsenen 60 bis 80 bpm und kann auf bis zu 180 bis 200 bpm unter Belastung ansteigen. Bei Makaken liegt sie höher als beim Menschen mit ungefähr 135 bis 190 bpm, wobei die Herzfrequenz unter körperlicher Belastung weit ansteigen kann auf 271 ± 8 bpm (Malinow et al., 1977).

Die Herzfrequenz spielt in der Sprachforschung eine zentrale Rolle. So zeigen neuere Studien, dass rhythmische Herzschläge die Gehirnaktivität beeinflussen und durch einen Mechanismus auch die Wahrnehmung von Sprachrhythmen modulieren können (Jammal Salameh et al., 2024). In der vorliegenden Studie ist die Herzfrequenz ein wichtiger physiologischer Parameter, der Erkenntnisse auf eine Korrelation von Sprache und Herz liefern soll.

1.2.3 Das Elektrokardiogramm und seine Nomenklatur

Mithilfe des Elektrokardiogramms ist es möglich physiologische Parameter auszuwerten, die zur Untersuchung dieser Studie dienen sollen. Das Elektrokardiogramm, kurz EKG, ist eine grafische (siehe Abbildung 1) und weltweit die meist genutzte nichtinvasive Untersuchungsmethode (Gertsch et al., 2008), um Rückschlüsse auf den Herzrhythmus, die Erregungsausbreitung- und Rückbildung im Herzen sowie die Lage des Herzens festzustellen. Der Sinusknoten mit seinem Sinusrhythmus stellt dabei eine feste Komponente des normalen EKGs dar. Beim Sinusrhythmus wird die elektrische Erregung im Sinusknoten generiert und breitet sich zunächst über das Vorhofmyokard aus. Anschließend wird sie über den Atrioventrikularknoten und das His-Purkinje-System auf das Ventrikelmuskulatur übertragen, was zur Depolarisation der Herzkammern führt (van der Maarel & Christoffels, 2024). Obwohl nichtmenschliche Primaten oft in biologischen Studien verwendet wurden, gibt es nur wenige elektrokardiografische Studien an japanischen Affen

(*Macaca fusucata*) und somit kaum Referenzdaten für diese Spezies (Yamaoka et al., 2013).

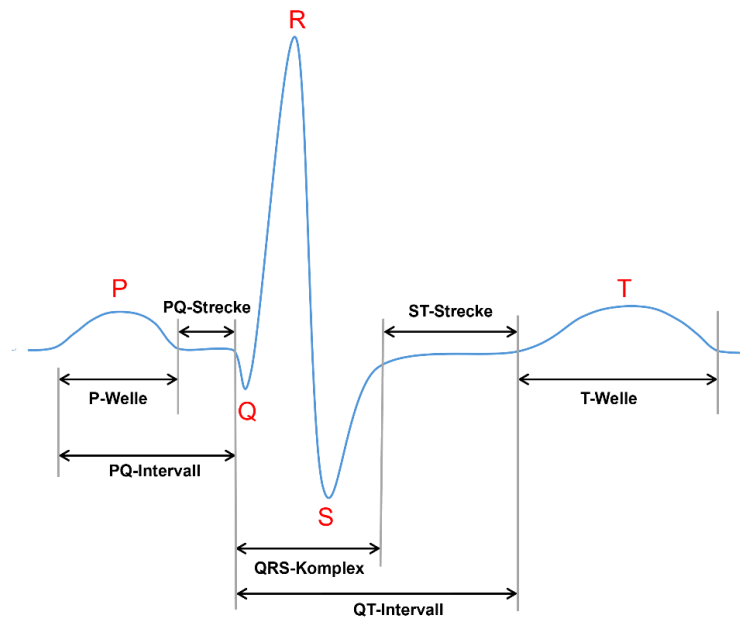


Abbildung 1: Darstellung eines Elektrokardiogramms

Die einzelnen Parameter des EKGs werden im Folgenden erläutert. Die Zeitangaben sind auf Menschen bezogen.

P-Welle

Die P-Welle repräsentiert die Ausbreitung der Erregung in den Vorhöfen des Herzens. Aufgrund der geringen Muskelmasse der Vorhöfe – die nur einen geringen Beitrag zur Pumpleistung leisten – ist sie relativ klein. Ihre Dauer beträgt weniger als 0,1 Sekunden. Die Erregung, die zur P-Welle führt, geht vom Sinusknoten aus (Aumüller et al., 2014).

PQ-Intervall

Das PQ-Intervall wird vom Beginn der P-Welle bis zum Anfang des QRS-Komplexes gemessen und dauert 0,13-0,20 Sekunden (Gertsch et al., 2008). Das Intervall zeigt die Zeit an, die die elektrische Erregung benötigt, um vom Sinusknoten durch den AV-Knoten zu kommen. Das PQ-Intervall ist abhängig von der Herzfrequenz.

PQ-Strecke

Die PQ-Strecke stellt eine isoelektrische Linie dar. Die Dauer beträgt 130-200 Millisekunden. Sie entspricht der Strecke vom Ende der P-Welle bis zum Anfang des QRS-Komplexes. Das Vorhofmyokard ist vollständig erregt, die Kammern vollständig unerregt. Die PQ-Strecke zeigt die atrioventrikuläre Überleitungszeit. Genauer gesagt ist es die Zeit, welche die elektrische Erregung durch den AV-Knoten zwischen Vorhofdepolarisation und Kammererregung durch den AV-Knoten benötigt.

QRS-Komplex

Der QRS-Komplex zeigt die Erregungsausbreitung in den Kammern. Anfangs findet diese Depolarisation entlang der Ventrikelbasis (Q-Zacke) statt, gefolgt in Richtung der Ventrikelbasis (R-Zacke) und abschließend werden die subepikardialen Anteile der linken Kammer depolarisiert (S-Zacke). Die QRS-Zeit dauert ca. 80-100 Millisekunden.

ST-Strecke

Die ST-Strecke erstreckt sich vom Ende des QRS-Komplexes bis zum Anfang der T-Welle. Diese läuft isoelektrisch ab und ist zeitlich von der Herzfrequenz abhängig. Es gibt keine relevanten Normwerte.

QT-Intervall

Das QT-Intervall läuft vom Beginn des QRS-Komplexes bis zum Ende der T-Welle ab. Die absolute QT-Zeit dauert ca. 300-400 Millisekunden und es ist abhängig von der Herzfrequenz. Die QT-Zeit stellt die vollständige intraventrikuläre Erregungsdauer bis zum Ende der Rückbildung (T-Welle) dar.

T-Welle

Die T-Welle spiegelt die Erregungsrückbildung in den Kammern wider. Die Repolarisation verläuft umgekehrt zum QRS-Komplex. Die T-Welle zeigt keine relevanten Normwerte (Gertsch et al., 2008), da der Übergang der ST-Strecke in die T-Welle oft fließend ist.

1.3 Wissenschaftliche Zielsetzung der Arbeit

In einer Studie mit Makaken (*Macaca fascicularis*) (Risueno-Segovia et al., 2022) konnte gezeigt werden, dass spontane Vokalisationen eng mit bestimmten perivokalen physiologischen Mustern verbunden sind. Zu den charakteristischen Veränderungen gehören eine Erhöhung der Herzfrequenz, der motorischen Aktivität sowie der 0,15-Hz-Mayer-Wellenleistung. Bereits zu Beginn der Vokalisation lässt sich ein beschleunigtes Herzfrequenzsignal beobachten. Laut den Ergebnissen von Risueno-Segovia spielen kardiorespiratorische Mechanismen eine wesentliche Rolle bei der Auslösung und Vorhersage von Stimmverhalten. Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, EKG-Parameter detailliert zu analysieren und zu klären, ob und wie sich diese Parameter verändern, wenn Makaken mit der Vokalisation beginnen. Hierdurch soll eine physiologische Verbindung zwischen spontaner Stimmbildung und dem Herz-Kreislaufsystem aufgedeckt werden. Die Analyse des Stimmsystems nichtmenschlicher Primaten könnte dabei entscheidende Einblicke in die Evolution der menschlichen Sprache liefern.

2 Methodik

Im folgenden Kapitel wird zunächst das methodische Gerüst mit Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung erklärt, um die dargelegten Hypothesen zu prüfen. Nachfolgend wird die statistische Auswertung beleuchtet.

2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau der vorliegenden Arbeit entspricht einer bereits abgeschlossenen Studie von Risueno-Segovia (Risueno-Segovia et al., 2022) und baut auf den Messergebnissen dieser Studie auf. In der abgeschlossenen Studie sind drei weibliche und drei männliche Affen (*Macaca fascicularis*) frei beweglich in zwei getrennten Käfigen untergebracht, wobei die Käfige nach Geschlechtern aufgeteilt sind.

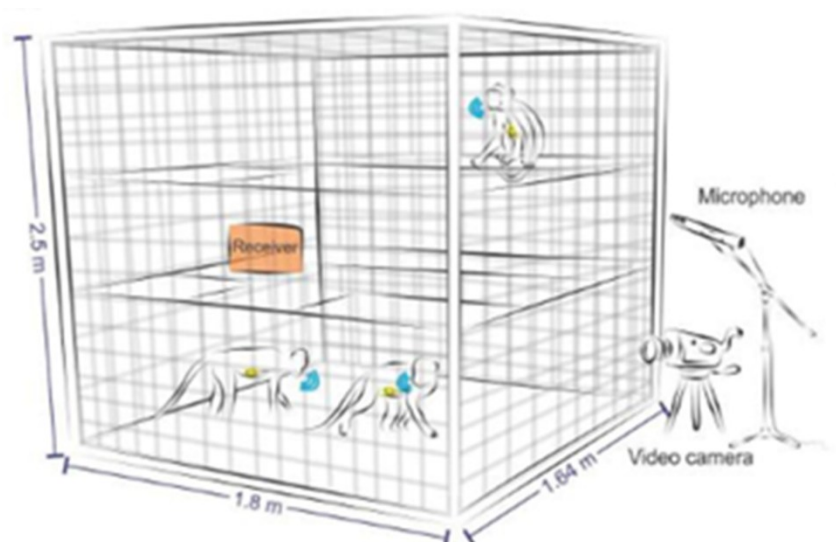


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Käfigs aus (Risueno-Segovia et al., 2022)

Die beiden Käfige standen im Centre de Recherches Biologiques in Baugy, Frankreich. Jeder Käfig war 2,5 x 1,64 x 1,8 Meter groß und war so aufgestellt, dass zwischen den beiden Käfigen für die Affen sowohl akustischer als auch sichtbarer Kontakt möglich war. Das Gewicht der Affen betrug zwischen drei und sieben Kilogramm und waren zum Zeitpunkt der Aufzeichnungen zwischen 28 und 48 Monate alt. Der Versuchsraum hatte eine Temperatur von 20 bis 24 °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 45 % bis 65 %. Die Raumbeleuchtung wechselte in einem Rhythmus von jeweils 12 Stunden zwischen hell und dunkel.

Alle Affen hatten Zugang zu Wasser und Nahrung, bestehend aus Gemüse, Obst, Müsli und Brot. Die Haltung der Affen war konform der europäischen Tierschutzrichtlinie 2010/63/UE vom 22.09.2010. Die Untersuchungen waren von der lokalen Ethikkommission in Form zweier klinischer experimenteller Studien genehmigt, deren Genehmigungsverfahren das Aktenzeichen #CEEA-111 hatte.

2.2 Versuchsdurchführung

2.2.1 Materialien

Zur Erhebung der EKG-Parameter hatten die Tiere aus einem Vorexperiment bereits telemetrische Sensoren implantiert. Erhoben und aufgezeichnet wurden folgende Daten: Blutdruck, Herzrate, körperliche Aktivität, Elektrokardiogramm sowie Ton- und Videoaufnahmen. Als Funktelemetriesender zur Messung von EKG, Blutdruck und Aktivität wurde ein Sender der Firma DSI (Data Sciences International) aus den USA verwendet von den Typen TL11M3D70PCTP und TL11M2D700PCT.

Die Aufnahmen der Affenlaute wurden mit einem Mikrofon (Modell ME64-Mikrofon mit K6 Vorverstärker) der Firma Sennheiser aus Deutschland aufgezeichnet, das in einem Abstand von ca. 10 cm von der Mitte der Vorderseite des Käfigs angebracht wurde. Über eine analog-digitale Schnittstelle (Abtastrate: 44,1 kHz, Micro 1401 mkII, Cambridge Electronic Design, Cambridge, UK) wurden die Tonaufnahmen mit der Software Spike2 in Version 7.19 von Cambridge Electronic Design aus England aufgezeichnet.

Die Affen wurden mit der 4K-Videokamera HC-VX989 von Panasonic aus Japan durchgängig gefilmt, um die Vokalisationen zu den einzelnen Affen zuzuordnen. Um präzise Zeitangaben zu gewährleisten, wurden die Telemetriewerte und die Stimmaufnahmen synchronisiert (Risueno-Segovia et al., 2022). Beginn und Ende der Vokalisationen wurden erst im zweiten Schritt mit Hilfe der Software Spike2 (Version 7.19, Cambridge Electronic Design) festgelegt.

Für die im Folgenden beschriebene Untersuchung werden nur Daten des Elektrokardiogramms und der Tonaufzeichnung genutzt.

2.2.2 Implantation des Telemetrie-Systems

Die beschriebenen Sensoren wurden den Affen in Vollnarkose in die Bauchhöhle implantiert. Die Vollnarkose wurde jeweils durch Propofol eingeleitet. Anschließend wurden die Affen mit Lachgas beatmet. Als Analgetika wurde den Affen Ketamin, Meloxicam und Buprenorphin verabreicht. Alle Affen bekamen zur Medikation dieselbe Dosis pro Kilogramm ihres Körpergewichts. Die postoperative Schmerzmedikation wurde insgesamt für zwei Tage weitergeführt. Zur Ableitung des EKGs wurde den Affen jeweils eine Elektrode an der linken Herzkammer am Perikard nahe dem Apex befestigt und eine weitere Elektrode am Perikard vor dem rechten Herzvorhof. Nach der Implantation wurde den Versuchstieren eine Erholungszeit von 3 Wochen eingeräumt, in welcher keine Messungen stattfanden.

2.2.3 Datenerhebung (Affengeräusche und EKG-Signale)

Das Telemetriesystem sendete die gemessenen EKG-Daten an einen Empfänger in der Nähe der Käfige. Dieser konnte mittels der Software von DSI (Data Sciences International) die Daten in eine lesbare Form und übertragen und speichern.

Insgesamt wurden an drei aufeinanderfolgenden Tagen Daten an den Affen erhoben. Für die vorliegende Studie wurden Daten von Versuchstag zwei zwischen 10:00 Uhr und 10:45 Uhr verwendet. Hierbei wurden 486 Laute ausgewertet. Die Laute verteilen sich wie folgt auf die 6 Affen:

*Tabelle 1: Anzahl der gemessenen Laute pro Affe und Geschlecht
(Risueno-Segovia et al., 2022)*

Affe	Gemessene Laute	Summe der gemessenen Laute nach Geschlecht
Affe 1 (männlich)	93	229
Affe 2 (männlich)	73	
Affe 3 (männlich)	63	
Affe 4 (weiblich)	112	257
Affe 5 (weiblich)	55	
Affe 6 (weiblich)	90	

2.3 Datenauswertung

2.3.1 Zeitliche Synchronisation von Vokalisation und EKG-Signal

Für die Auswertung war die Zuordnung von Lautäußerungen zu EKG-Daten nötig. Als Werkzeug diente dafür das Programm Spike 2.

Die Spektrogramme der Vokalisationen wurden anhand von 100 Sekunden Datenpaketen berechnet, 50 Sekunden vor und nach Vokalisationsbeginn. Für die Aufnahmen war jeweils eine der im Folgenden beschriebenen Situation erforderlich: Die Affen mussten ca. 15 Sekunden keine Laute abgeben, dann erfolgte der Beginn der Lautäußerungen, gefolgt von ca. 15-20 Sekunden Vokalisation und abschließend wieder eine Ruhephase von ca. 15 Sekunden. Da das EKG-Signal simultan aufgezeichnet wurde, umfasst es somit Daten über eine Dauer von 15 Sekunden vor bis 15 Sekunden nach Lautäußerung.

Mit Hilfe des Spike-2-Programms wurde das Spektrogramm der Vokalisation mit dem EKG-Signal zeitgleich zusammengebracht. Somit konnten Sequenzen ermittelt werden, die die drei unterschiedlichen Phasen (Ruhephase, Vokalisationsbeginn und Vokalisationsende) einer Lautäußerung festlegten (siehe Abbildung 3). Die zugeordneten Aufnahmesequenzen (Output Spike 2 Programm) wurden exportiert und mit Hilfe von MATLAB statistisch analysiert.

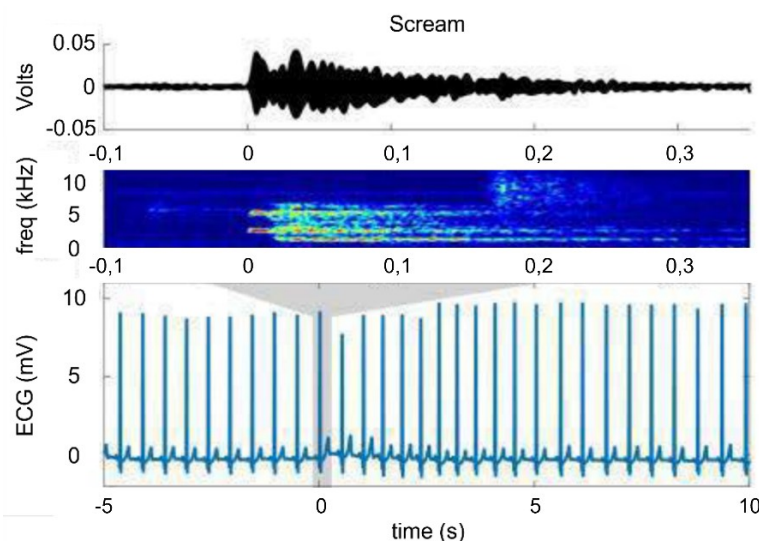


Abbildung 3: Exemplarisches EKG mit korrelierender Vokalisation (Risueno-Segovia et al., 2022)

2.3.2 Ermittlung der EKG-Parameter

Ein EKG-Signal einer Messsequenz (siehe Abbildung 4) erstreckt sich zunächst von -5 bis 5 Sekunden. Die Kürzung der Dauer des EKG-Signals verspricht eine genauere Beurteilung der Parameter vor und nach der Vokalisation. Ab Sekunde 0 beginnt der Affe zu vokalisieren. Mittels dem Softwareprogramm MATLAB wurden die EKG-Parameter nach Kapitel 1.2 ermittelt.

Die Herzfrequenz wurde mit Hilfe der Anzahl der R-Spitzen berechnet. Dafür wurden alle 486 EKG-Messsequenzen (siehe Abbildung 4) der insgesamt sechs Affen mit ihren jeweiligen Maxima versehen, d.h. die R-Spitze entspricht immer dem größten Ausschlag im Signal.

Die Signalabschnitte zwischen den R-Spitzen wurden näher untersucht, um die Dauer der einzelnen Parameter zu berechnen. Die Begrenzung zwischen zwei R-Spitzen wurde genutzt, um Maxima und Minima mittels einer Programmierschleife zu suchen und festzulegen. Folgenden Datenpunkte wurden festgelegt (siehe Abbildung 4):

- P-Welle
- T-Welle
- Start P-Welle
- Ende P-Welle
- Start T-Welle
- Ende T-Welle
- Q-Punkte (entspricht Anfang „Q-Welle“)
- S-Punkte (entspricht Ende „S-Welle“)
- Minimum Q-Ausschlag
- Minimum S-Ausschlag

Hierfür wurden 10 Punkte pro EKG-Phase (Anfang P-Welle bis Ende T-Welle) ermittelt. Das EKG-Signal wurde mit den jeweiligen Charakteristika (Start- und Endpunkte, Maxima bzw. Minima im Intervall) jeweils annotiert (siehe Abbildung 4).

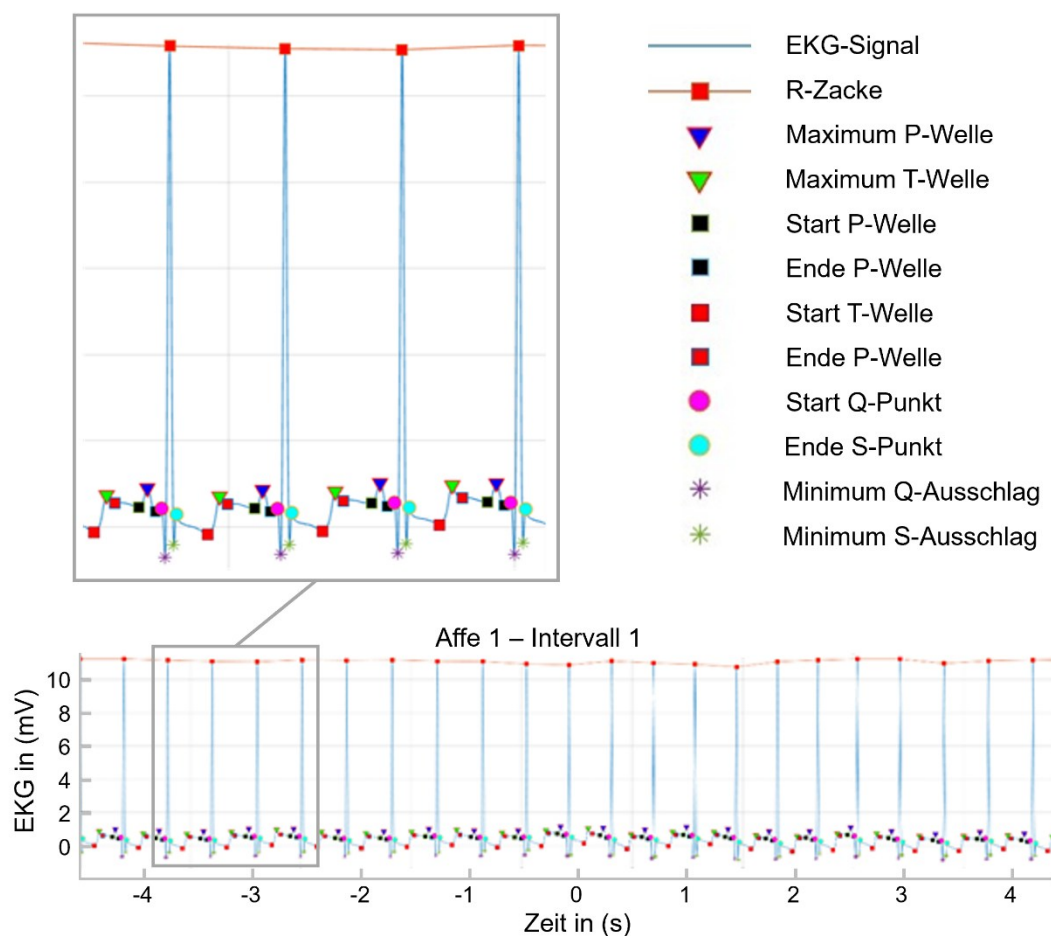


Abbildung 4: Exemplarisches annotiertes EKG-Signal einer Messsequenz

Anschließend wurden die Mittelwerte je Parameter über die Zeiträume von $[-1;0]$, $[-2;0]$, ..., $[-5;0]$ und $[0;1]$, $[0;2]$, ..., $[0;5]$ berechnet (siehe Anhang 9.1 - 9.12). Mithilfe dieser Daten wurde anschließend analysiert, ob sich die Mittelwerte der Parameter zum Nullpunkt hin bzw. vom Nullpunkt weg unterscheiden. Die Mittelwerte der Parameter sind in einer Tabelle (siehe Anhang 9.1 - 9.12) aufgeführt. Pro Zeile stammen die Werte aus einer EKG-Messsequenz (z.B. siehe 9.1, Affe 1, 1-93 Messsequenzen). Zunächst wurden die Parameter als Mittelwert, Standardfehler des Mittelwerts (Standard Error of the Mean, kurz SEM) und als Standardabweichung (Standard Deviation, kurz SD oder STD) grafisch dargestellt (siehe Anhang 9.13). Diese grafische Gegenüberstellung wurde genutzt, um den genaueren zu untersuchenden Zeitraum von $[-2;2]$ festzulegen. In diesem Zeitraum finden sichtbare Veränderungen vor und nach der Vokalisation statt (siehe Anhang 9.13).

Anschließend wurden Boxplots (siehe Ergebnisse 3.1 - 3.8) erstellt, um die Ergebnisse vor und nach der Vokalisation grafisch darzustellen. Hierzu wurden wie vorher festgelegt die Zeitintervalle $[-2;0]$ und $[0;2]$ direkt gegenübergestellt.

2.3.3 Statistische Auswertung der Messergebnisse

Die statistische Analyse der Messdaten wurde mit Hilfe der Software Matlab (MathWorks, Natick, MA) durchgeführt. Die betrachteten Sachverhalte und Zusammenhänge werden im Folgenden genauer erläutert. Als Basis dienen die nach Kapitel 2.3.2 ermittelten EKG-Parameter.

Zunächst wurden für die Messbereiche vor und nach der Vokalisation (hier $[-2,0]$ und $[0;2]$ Sekunden) die deskriptiven Merkmale der EKG-Parameter verglichen. Dies geschieht insbesondere grafisch mithilfe von Boxplots (siehe Ergebnisse 3.1 - 3.8). Darüber hinaus wurde mit Hilfe eines statistischen Tests untersucht, ob sich die EKG-Parameter vor und nach der Vokalisation unterscheiden. Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test wurde verwendet, um folgende Hypothesen zu prüfen:

- H_0 : Mittelwerte der Parameter sind für $[-2;0]$ und $[0;2]$ gleich
- H_1 : Mittelwerte der Parameter sind für $[-2;0]$ und $[0;2]$ nicht gleich.

Der Test wurde für jeden Affen und jeden EKG-Parameter einzeln durchgeführt. Dabei setzt sich die Stichprobe aus allen Mittelwerten des jeweiligen EKG-Parameters der unterschiedlichen Messsequenzen (unterschiedliche Vokalisationen) zusammen (siehe Anhang 9.1 - 9.12). Als Signifikanzniveau wurde für alle Tests $\alpha = 0,05$ verwendet und mit einem Signifikanzsternchen grafisch dargestellt, sobald eine Nullhypothese verworfen werden konnte. Um die Anzahl der Messsequenzen zu erhöhen, wurde der gleiche Test auf die kombinierten Mittelwerte des jeweiligen EKG-Parameters aller Affen angewendet (siehe Tabelle 2).

Für die Ermittlung des Einflusses des Geschlechts wurden zwei unterschiedliche statistische Tests angewendet. Identisch zum bisherigen Vorgehen wird der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test nun für die getrennten Mittelwerte der EKG-Parameter aller weiblichen und männlichen Affen genutzt. Als zusätzlicher Test wird eine zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) herangezogen, um

gleichzeitig die Wirkung mehrerer Faktoren auf die EKG-Parameter zu bestimmen sowie zusätzliche Interaktionseffekte zu erfassen. Dabei bildet der Messbereich vor und nach der Vokalisation den ersten Faktor und das Geschlecht den zweiten Faktor. Für eine standardmäßige ANOVA müssen die zu untersuchenden Daten die Homoskedastizität sowie die Normalverteilung der Daten als Voraussetzung erfüllen. Hierzu wurde mit Hilfe des Levene-Tests die Homoskedastizität der vier Gruppen (männliche Affen vor der Vokalisation, männliche Affen nach der Vokalisation, weibliche Affen vor der Vokalisation, weibliche Affen nach der Vokalisation) und jeden EKG-Parameter anhand der folgenden Hypothesen untersucht:

- H0: Die Varianzen aller Gruppen sind gleich.
- H1: Mindestens eine Gruppe hat eine unterschiedliche Varianz.

Die Normalverteilung der gemessenen Daten der jeweiligen EKG-Parameter wurde durch die Anwendung des Shapiro-Wilk-Tests anhand folgender Hypothesen geprüft:

- H0: Die Daten stammen aus einer normalverteilten Grundgesamtheit.
- H1: Die Daten stammen nicht aus einer normalverteilten Grundgesamtheit.

Die Analyse der Messdaten mit Hilfe der beiden Tests zeigte, dass die Normalverteilung der Daten für alle EKG-Parameter nicht gegeben ist und die Homoskedastizität lediglich bei 3 von 5 Parametern (P-Welle, PQ-Strecke, QRS-Komplex) erfüllt wird. Um dennoch den Geschlechtereinfluss zu untersuchen, wurde die „Aligned Rank Transform“ (ART) ANOVA verwendet (Wobbrock et al., 2011). Dabei handelt es sich um einen nicht parametrischen Test, bei dem zunächst für jeden Haupteffekt und jede Interaktion der Einfluss der anderen Terme mathematisch entfernt wird (Alignment) und anschließend die „ausgerichteten“ Residuen in Ränge umgewandelt werden (Ranking). Auf diese transformierten Daten wird nachfolgend eine klassische ANOVA angewendet und folgende Hypothesen geprüft:

- H0,1: Mittelwerte der Parameter sind für [-2;0] und [0;2] gleich. (Zeitraum)
- H0,2: Mittelwerte der Parameter sind für männliche und weibliche Affen gleich. (Geschlecht)

- H0,3: Es gibt keine Wechselwirkung zwischen dem Messbereich ([-2;0] bzw. [0;2]) und dem Geschlecht. (Interaktion: Zeitraum*Geschlecht)

Anschließend Post-hoc-Tests ermöglichen den paarweisen Vergleich der einzelnen Gruppen zur genaueren Analyse der Unterschiede bei einem signifikanten Ergebnis (Lisa A., 2021). Dabei wurde die Bonferroni-Korrektur zur Anpassung des Signifikanzniveaus angewandt, um die Alphafehler-Kumulierung aufgrund der multiplen Hypothesen der ANOVA zu reduzieren (siehe Tabelle 4).

3 Ergebnisse

Im nachfolgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Studie dargelegt. Zunächst werden die Mittelwerte der EKG-Parameter vor und nach der Vokalisation für jeden Affen anhand von Boxplots gegenübergestellt und auf statistische Signifikanz untersucht. Anschließend folgt die Darstellung der Ergebnisse zum Geschlechtervergleich.

3.1 Herzfrequenz

Die Boxplots der Herzfrequenz sind in Abbildung 5 dargestellt. Es lassen sich bei fünf von sechs Affen signifikante Unterschiede für die Mittelwerte vor und nach der Vokalisation feststellen. Dies trifft auf Affe 1 ($p = 0,09e-1$; $n = 93$; Wilcoxon-Test), Affe 2 ($p = 1,02e-11$; $n = 73$; Wilcoxon-Test), Affe 4 ($p = 2,68e-07$; $n = 112$; Wilcoxon-Test), Affe 5 ($p = 0,09e-1$; $n = 55$; Wilcoxon-Test) und Affe 6 ($p = 0,06e-2$; $n = 90$; Wilcoxon-Test) zu. Auch der gemeinsame Mittelwert aller Affen zeigt eine statistisch signifikante Entwicklung ($p = 1,97e-19$; $n = 486$; Wilcoxon-Test). Ausgenommen ist Affe 3 ($p = 0,58$; $n = 63$; Wilcoxon-Test).

Bei den Affen 1 und 3 verringert sich der Median der Herzfrequenz im untersuchten Zeitintervall, wobei bei Affe 3 dies nur minimal ist. Bei den anderen vier Affen steigt der Median der Herzfrequenz. Die Mediane reichen von 179 Schlägen pro Minute im Zeitintervall $[-2;0]$ bei Affe 1 bis 130 bpm im Zeitintervall $[-2;0]$ bei Affe 6. Die Minimalwerte reichen von 81 bpm im Zeitintervall $[-2;0]$ bei Affe 6 bis zu einem Maximalwert von 231 bpm im Zeitintervall $[-2;0]$ bei Affe 1. Der Median über alle Affen steigt von 151 bpm vor der Lautäußerung auf 154 bpm an. Bei den Affen 1 und 3 sind die Maxima im untersuchten Zeitintervall deutlich über 200 bpm.

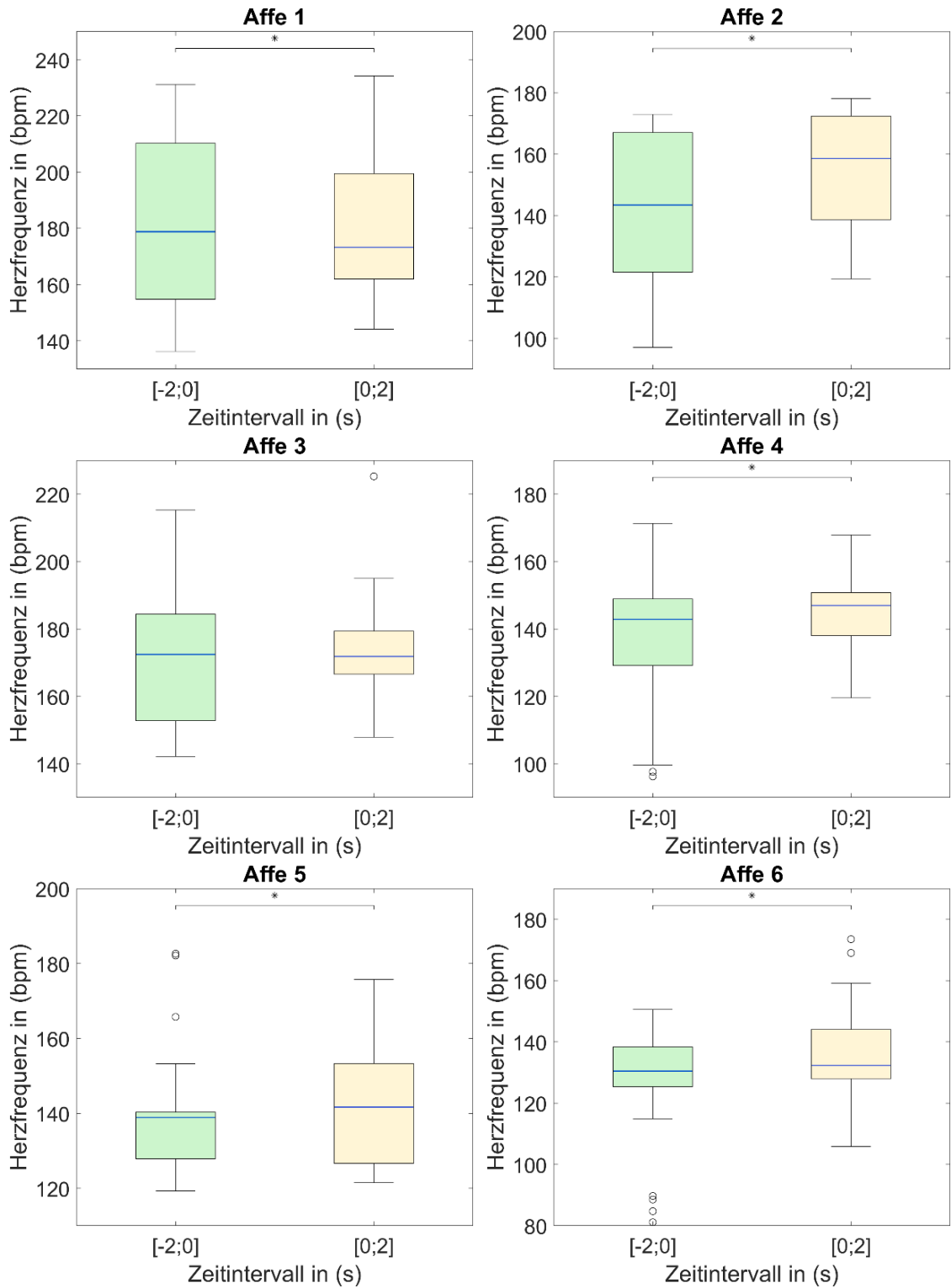


Abbildung 5: Vergleich der Herzfrequenz je Affe vor und nach der Vokalisation
Legende: ■ Mittelwerte im Zeitintervall [-2,0] vor der Vokalisation, ■ Mittelwerte im Zeitintervall [0,2] nach der Vokalisation, — Median, ○ Ausreißer, * $p < 0,05$

3.2 P-Welle

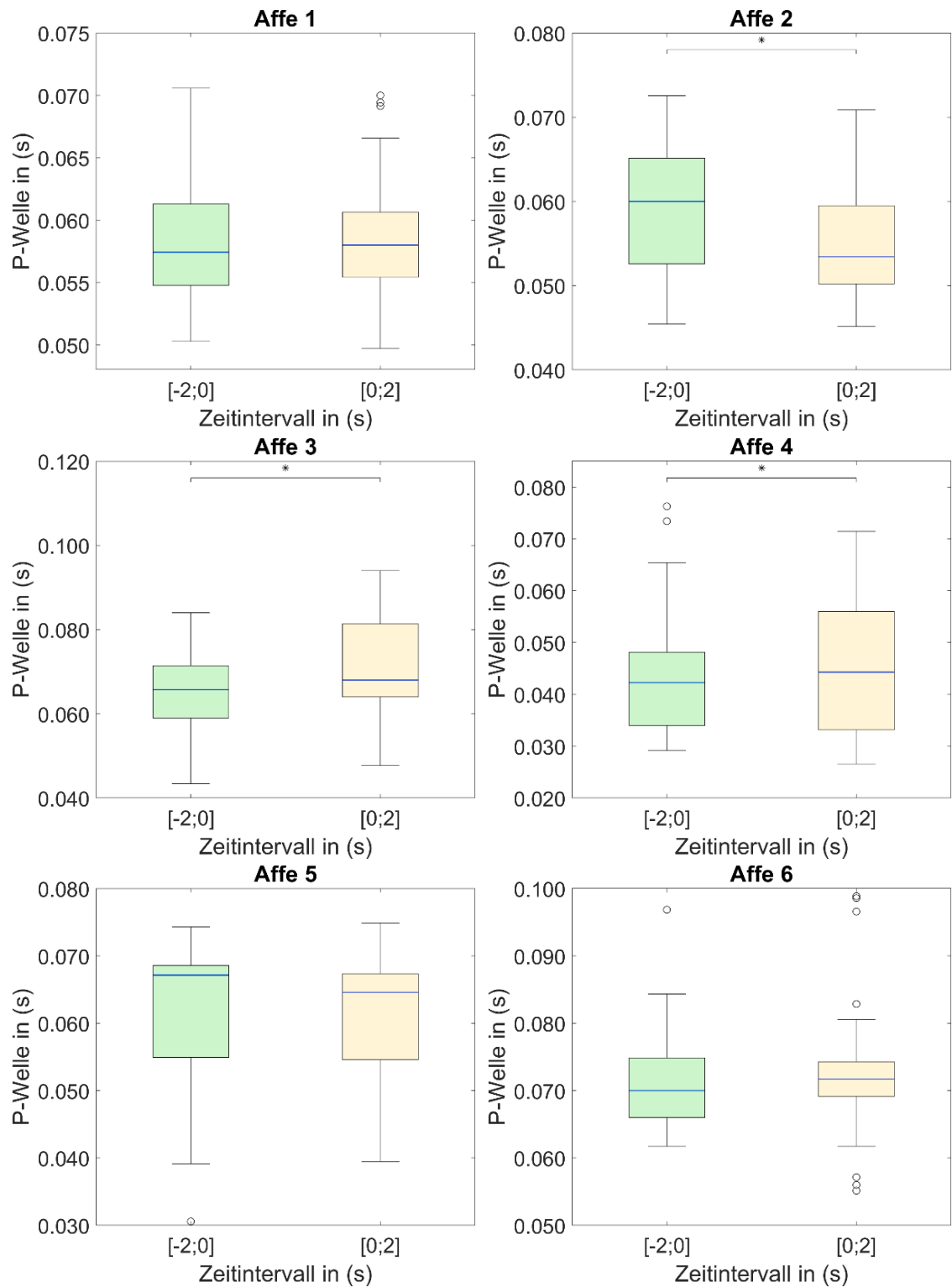


Abbildung 6: Vergleich der P-Welle je Affe vor und nach der Vokalisation
 Legende: ■ Mittelwerte im Zeitintervall [-2,0] vor der Vokalisation, ■ Mittelwerte im Zeitintervall [0,2] nach der Vokalisation, — Median, ○ Ausreißer, * $p < 0,05$

Bei Betrachtung der P-Welle in Abbildung 6 ist festzustellen, dass nur die Hälfte der Affen signifikante Ergebnisse aufzeigen. So ist Affe 2 ($p = 1,59e-05$; $n = 73$; Wilcoxon-Test), Affe 3 ($p = 0,017$; $n = 63$; Wilcoxon-Test) und Affe 4 statistisch signifikant ($p = 0,01$; $n = 112$; Wilcoxon-Test). Bei Affe 1 ($p = 0,26$; $n = 93$; Wilcoxon-Test), Affe 5 ($p = 0,12$; $n = 55$; Wilcoxon-Test), Affe 6 ($p = 0,66$; $n = 90$; Wilcoxon-Test) sowie beim Mittelwert aller Affen ($p = 0,44$; $n = 486$; Wilcoxon-Test) wird die Nullhypothese nicht abgelehnt.

Eine Vergrößerung des Medians im untersuchten Zeitintervall zeigen Affe 1, 3, 4 und 6, wohingegen Affe 2 und 5 eine Verkleinerung des Medianwerts nachweist. Der Median wird somit bei 4 von 6 Affen größer. Den niedrigsten Median hat Affe 4 im Zeitintervall $[-2;0]$ mit 0,04 Sekunden. Bei Affe 2 lässt sich der höchste Median mit 0,06 Sekunden im Zeitintervall $[-2;0]$ erkennen. Die Mediane liegen somit im Bereich zwischen 0,04 und 0,06 Sekunden.

Bei Affe 3 liegt das Maximum der P-Wellenlänge im Zeitintervall $[0;2]$ deutlich höher als bei den anderen Affen. Bei den Affen 1, 2, 4 und 5 sind die Maxima unter 0,08 Sekunden, bei Affe 3 und 6 erreichen die Maxima sogar Werte bis 0,4 Sekunden. Die Werte der P-Welle reichen insgesamt von minimal 0,03 Sekunden bei Affe 4 im Zeitintervall $[0;2]$ bis maximal 0,35 Sekunden bei Affe 3 im Zeitintervall $[0;2]$.

3.3 PQ-Intervall

Bei Betrachtung der p-Werte des PQ-Intervalls in Abbildung 7 fallen zwei Affen über dem statistischen Signifikanzniveau mit abgelehnter Nullhypothese auf. Dies trifft bei Affe 2 ($p = 1,49e-07$; $n = 73$; Wilcoxon-Test) und bei Affe 3 ($p = 0,03e-1$; $n = 63$; Wilcoxon-Test) zu. Die Affen 1 ($p = 0,97$; $n = 93$; Wilcoxon-Test), Affe 4 ($p = 0,62$; $n = 112$; Wilcoxon-Test), Affe 5 ($p = 0,30$; $n = 55$; Wilcoxon-Test) und Affe 6 ($p = 0,30$; $n = 90$; Wilcoxon-Test) zeigen keine signifikanten Ergebnisse auf. Kein Weibchen weist eine statistische Signifikanz auf. Auch alle Mittelwerte aller Affen zusammen betrachtet zeigen keine Signifikanz auf ($p = 0,09$; $n = 486$; Wilcoxon-Test).

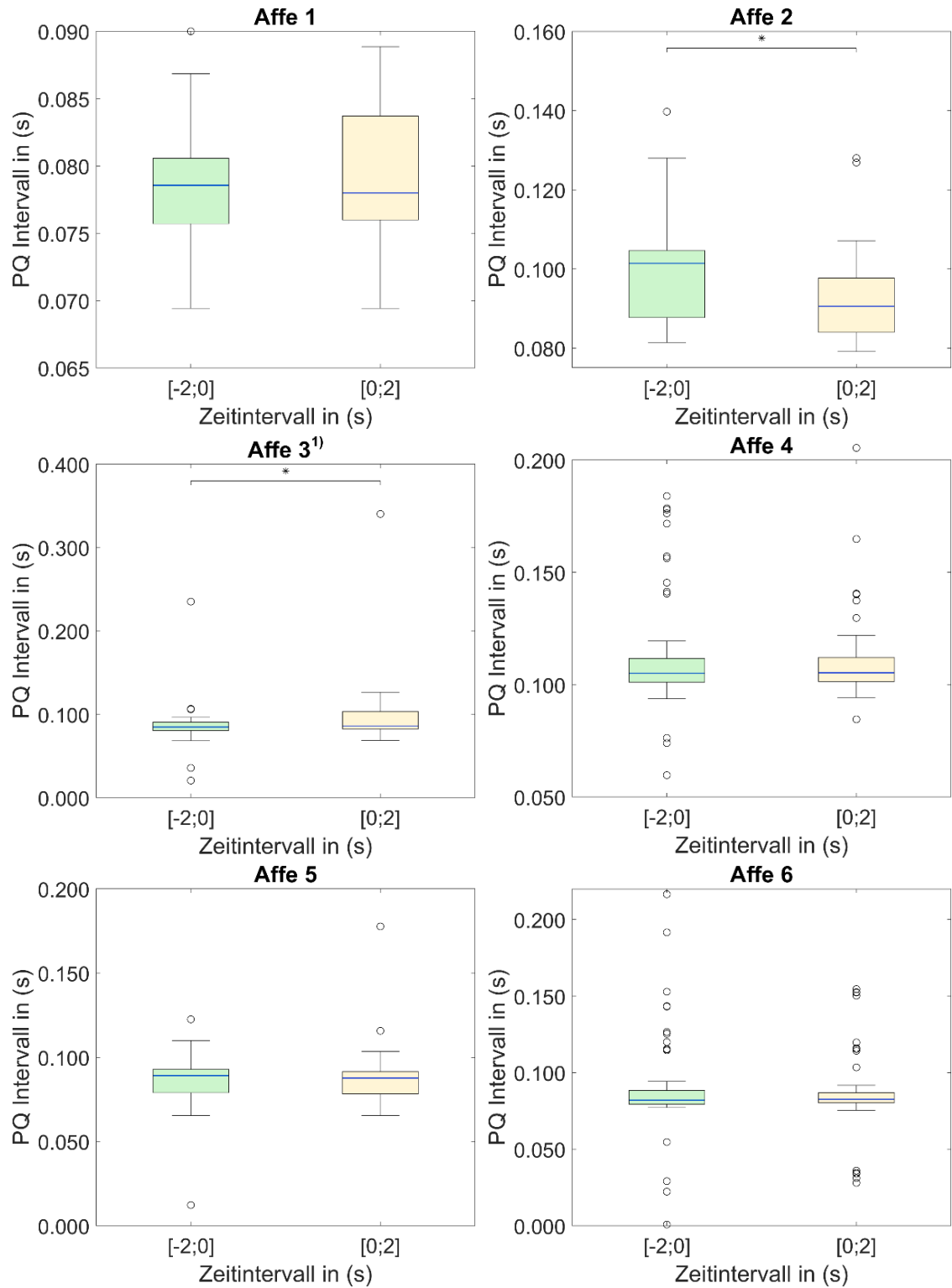


Abbildung 7: Vergleich des PQ-Intervalls je Affe vor und nach der Vokalisation
Legende: ■ Mittelwerte im Zeitintervall [-2,0] vor der Vokalisation, ■ Mittelwerte im Zeitintervall [0,2] nach der Vokalisation, — Median, ○ Ausreißer, * $p < 0,05$,
¹⁾ Aus Darstellungsgründen sind nicht alle Ausreißer dargestellt

Die Mediane des PQ-Intervalls steigen bei 3 von 6 Affen (3, 4 und 6). Bei der anderen Hälfte der Affen sinken diese (Affe 1, 2 und 5). Bei Affe 1 lässt sich der niedrigste Median mit 0,08 Sekunden im Zeitintervall [0;2] erkennen. Den höchsten Median weist im Zeitintervall [-2;0] Affe 4 mit 0,11 Sekunden auf. Die Werte des Medians liegen somit im Bereich zwischen 0,08 und 0,11 Sekunden. Die Mediane der Affen 2 und 3, welche statistisch signifikante Ergebnisse aufweisen, verhalten sich konträr. Bei Affe 2 fällt der Median im untersuchten Zeitintervall, bei Affe 3 steigt dieser minimal.

Die Werte des PQ-Intervalls reichen von minimal 0,08e-2 Sekunden (Affe 6) im Zeitintervall [0;2] bis maximal 1,06 Sekunden (Affe 3) im Zeitintervall [0;2]. Affe 2 und 3 erreichen Werte des PQ-Intervalls über 1 Sekunde. Affe 2 ist mit fast 1,8 Sekunden überdurchschnittlich hoch.

3.4 PQ-Strecke

Bei Untersuchung der PQ-Strecke in Abbildung 8 fällt auf, dass jeweils ein Männchen (Affe 2 mit $p = 2,05e-7$; $n = 73$; Wilcoxon-Test) und ein Weibchen (Affe 4 mit $p = 0,04e-1$; $n = 112$; Wilcoxon-Test) signifikante Testergebnisse aufzeigen, sowie alle Mittelwerte aller Affen zusammen betrachtet ($p = 0,02e-1$; $n = 486$; Wilcoxon-Test). Die anderen Affen haben keine statistische signifikante Entwicklung der Mittelwerte, sodass die Nullhypothese für Affe 1 ($p = 0,25$; $n = 93$; Wilcoxon-Test), Affe 3 ($p = 1$; $n = 63$; Wilcoxon-Test), Affe 5 ($p = 0,73$; $n = 55$; Wilcoxon-Test) und Affe 6 ($p = 0,28$; $n = 90$; Wilcoxon-Test) nicht abgelehnt werden kann.

Den niedrigsten Median hat Affe 3 im Zeitintervall [-2;0] mit 0,02 Sekunden. Bei Affe 4 lässt sich der höchste Median mit 0,06 Sekunden im Zeitintervall [-2;0] erkennen. Bei vier von sechs Affen sinkt der Medianwert (Affe 1, 2, 3 und 4). Die Werte der PQ-Strecke aller Affen reichen von minimal 0,01 Sekunden (Affe 6) im Zeitintervall [0;2] bis maximal 0,99 Sekunden (Affe 3) im Zeitintervall [0;2].

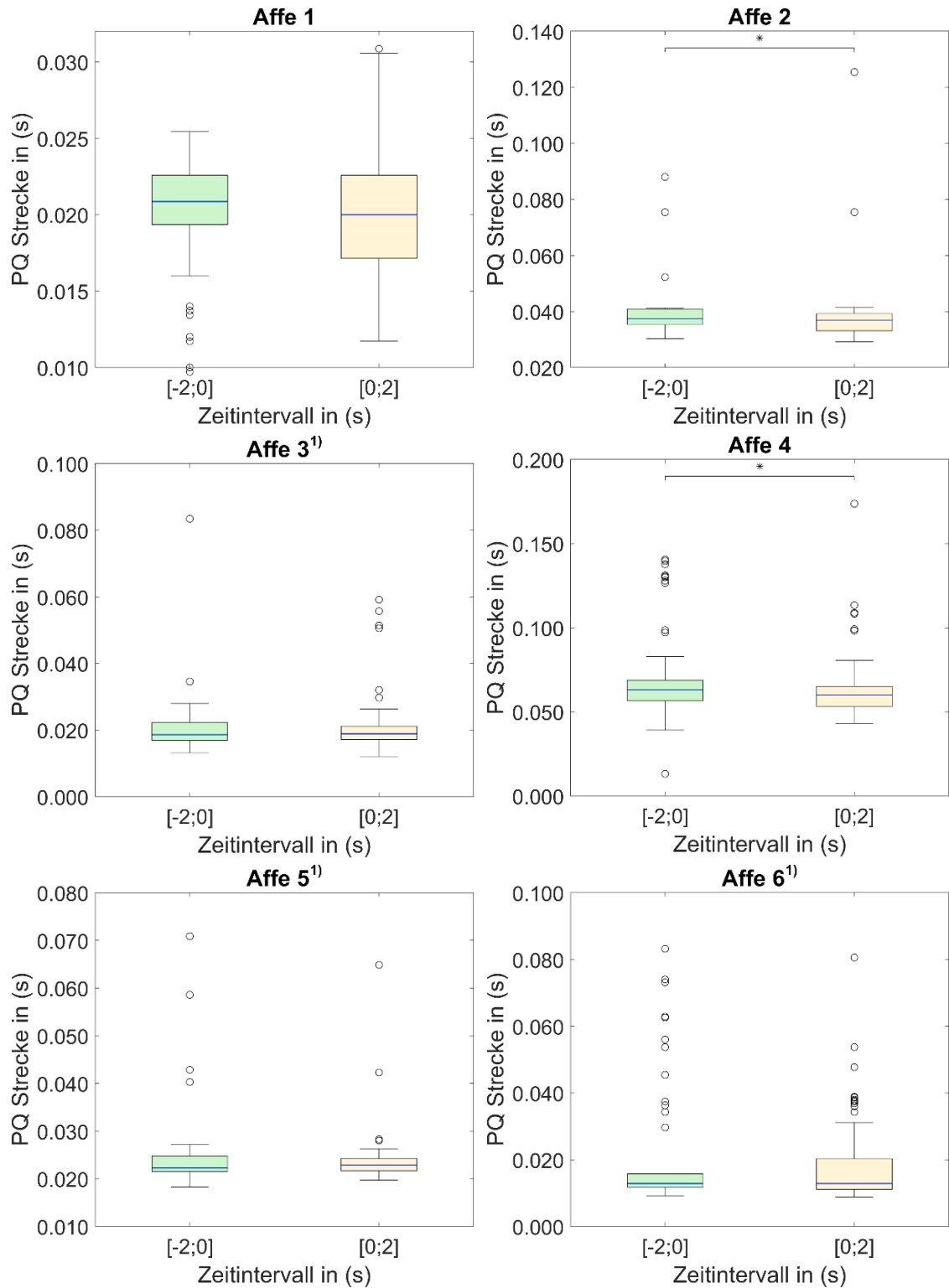


Abbildung 8: Vergleich der PQ-Strecke je Affe vor und nach der Vokalisation
Legende: ■ Mittelwerte im Zeitintervall [-2,0] vor der Vokalisation, ■ Mittelwerte im Zeitintervall [0,2] nach der Vokalisation, — Median, ○ Ausreißer, * $p < 0,05$,
¹⁾ Aus Darstellungsgründen sind nicht alle Ausreißer dargestellt

3.5 QRS-Komplex

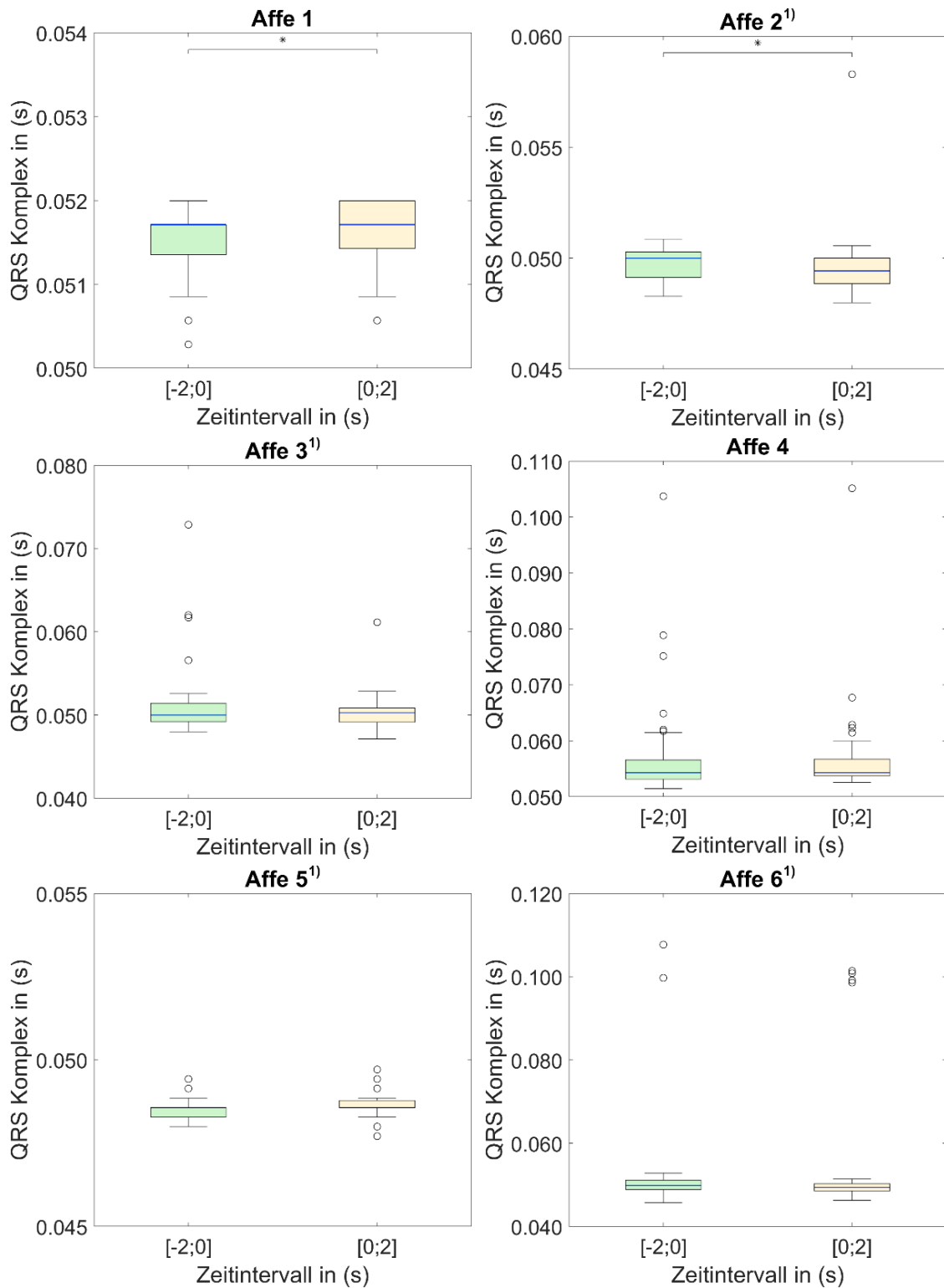


Abbildung 9: Vergleich des QRS-Komplexes je Affe vor und nach der Vokalisation
 Legende: ■ Mittelwerte im Zeitintervall [-2,0] vor der Vokalisation, ■ Mittelwerte im Zeitintervall [0,2] nach der Vokalisation, — Median, ○ Ausreißer, * $p < 0,05$,
¹⁾ Aus Darstellungsgründen sind nicht alle Ausreißer dargestellt

In Abbildung 9 werden die Ergebnisse des QRS-Komplexes im Zeitintervall [-2;2] graphisch dargestellt. Bei Betrachtung der p-Werte fällt auf, dass nur die ersten zwei männlichen Affen eine statistisch signifikante Entwicklung der Mittelwerte aufweisen. Dies sind Affe 1 ($p = 0,04e-2$, $n = 93$, Wilcoxon-Test) und Affe 2 ($p = 0,05e-2$, $n = 73$, Wilcoxon-Test). Für die Affen 3 ($p = 0,30$; $n = 63$; Wilcoxon-Test), 4 ($p = 0,37$; $n = 112$; Wilcoxon-Test), 5 ($p = 0,20$; $n = 55$; Wilcoxon-Test) und 6 ($p = 0,20$; $n = 90$; Wilcoxon-Test) lässt sich die Nullhypothese nicht verwerfen, ebenso wie für die Entwicklungen der Mittelwerte aller Affen ($p = 0,76$; $n = 486$; Wilcoxon-Test).

Die Mediane reichen von 0,049 Sekunden bei Affe 5 im Zeitintervall von [-2;0] und [0;2] bis 0,054 Sekunden bei Affe 4 im Zeitintervall von [-2;0] und [0;2]. Die Werte des QRS-Komplexes reichen von minimal 0,06e-2 Sekunden bei Affe 2 im Zeitintervall [0;2] bis maximal 0,25 Sekunden bei Affe 5 im Zeitintervall [-2;0]. Bei Affe 1 und 4 steigen die Mediane, bei Affe 2, 3, 5 und 6 sinken diese, obgleich sie sich minimal verändern.

3.6 ST-Strecke

In Abbildung 10 wird die ST-Strecke mit ihren Ergebnissen dargestellt. Es fällt direkt auf, dass nur zwei weibliche Affen statistisch signifikante Entwicklungen der Mittelwerte aufweisen. Dies trifft bei Affe 4 ($p = 0,17e-3$; $n = 112$; Wilcoxon-Test) und Affe 6 ($p = 0,03$; $n = 90$; Wilcoxon-Test) zu. Bei Affe 1 ($p = 0,16$; $n = 93$; Wilcoxon-Test), Affe 2 ($p = 0,65$; $n = 73$, Wilcoxon-Test), Affe 3 ($p = 0,42$; $n = 63$; Wilcoxon-Test), Affe 5 ($p = 0,73$; $n = 55$; Wilcoxon-Test) sowie bei den Mittelwerten aller Affen ($p = 0,07$; $n = 486$; Wilcoxon-Test) kann die Nullhypothese nicht abgelehnt werden.

Bei den Affen 1, 2 und 4 sinkt der Median. Bei Affe 3 steigt dieser leicht, wobei bei Affe 6 der Median gleichbleibt und 0,06e-1 Sekunden beträgt. Die Mediane von der ST-Strecke reichen von 0,06e-1 Sekunden bei Affe 6 im Zeitintervall von [-2;0] und [0;2] bis 0,08 Sekunden bei Affe 1 im Zeitintervall [-2;0]. Die Mittelwerte reichen von 0,02e-1 Sekunden bei Affe 6 im Zeitintervall [0;2] bis 0,33 Sekunden bei Affe 5 im Zeitintervall [-2;0].

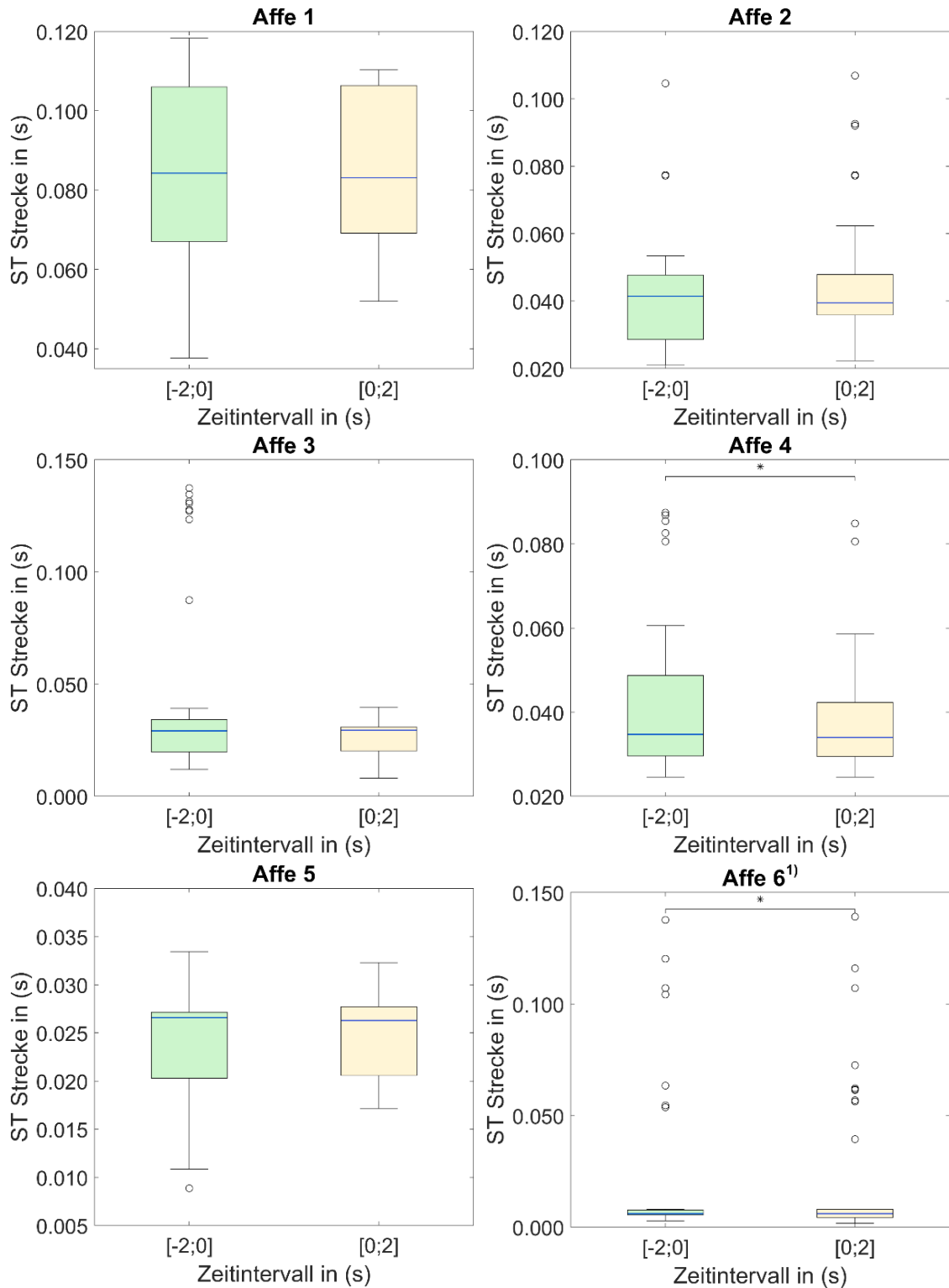


Abbildung 10: Vergleich der ST-Strecke je Affe vor und nach der Vokalisation
Legende: ■ Mittelwerte im Zeitintervall [-2,0] vor der Vokalisation, ■ Mittelwerte im Zeitintervall [0,2] nach der Vokalisation, — Median, ○ Ausreißer, * $p < 0,05$,
¹⁾ Aus Darstellungsgründen sind nicht alle Ausreißer dargestellt

3.7 QT-Intervall

In der Abbildung 11 ist die Entwicklung der QT-Intervalle im Zeitintervall [-2;2] dargestellt. Die Mittelwerte der QT-Intervalle im gemessenen Zeitintervall sind bei Affen 1 ($p = 0,01$; $n = 93$; Wilcoxon-Test), Affe 2 ($p = 0,37e-2$; $n = 73$; Wilcoxon-Test), Affe 4 ($p = 0,13e-2$; $n = 112$; Wilcoxon-Test) und Affe 6 ($p = 0,12e-2$; $n = 90$; Wilcoxon-Test) statistisch signifikant. Auch die Nullhypothese für die Entwicklung der Mittelwerte aller Affen ($p = 1,7 e-08$; $n = 486$; Wilcoxon-Test) kann verworfen werden, jedoch nicht für Affe 3 ($p = 0,90$; $n = 63$; Wilcoxon-Test) und Affe 5 ($p = 0,19$; $n = 55$; Wilcoxon-Test).

Den niedrigsten Median hat Affe 1 mit 0,22 Sekunden im Zeitintervall [0;2]. Bei Affe 6 lässt sich der höchste Median mit dem Wert von 0,25 Sekunden im Zeitintervall [-2,0] erkennen. Bei den Affen 2 und 3 steigt der Median, bei Affe 1 fällt der Median im Zeitintervall von [-2,0] auf [0,2]. Affe 3 ist jedoch nicht über dem statistischen Signifikanzniveau bei der Entwicklung der Mittelwerte mit einem p-Wert von 0,90. Bei den Affen 3, 4 und 5 Affen fallen die Mediane.

Die Mittelwerte des QT-Intervalls reichen von minimal 0,18 Sekunden im Zeitintervall [-2;0] bei Affe 5 bis maximal 0,71 Sekunden im Zeitintervall [-2;0] bei Affe 6.

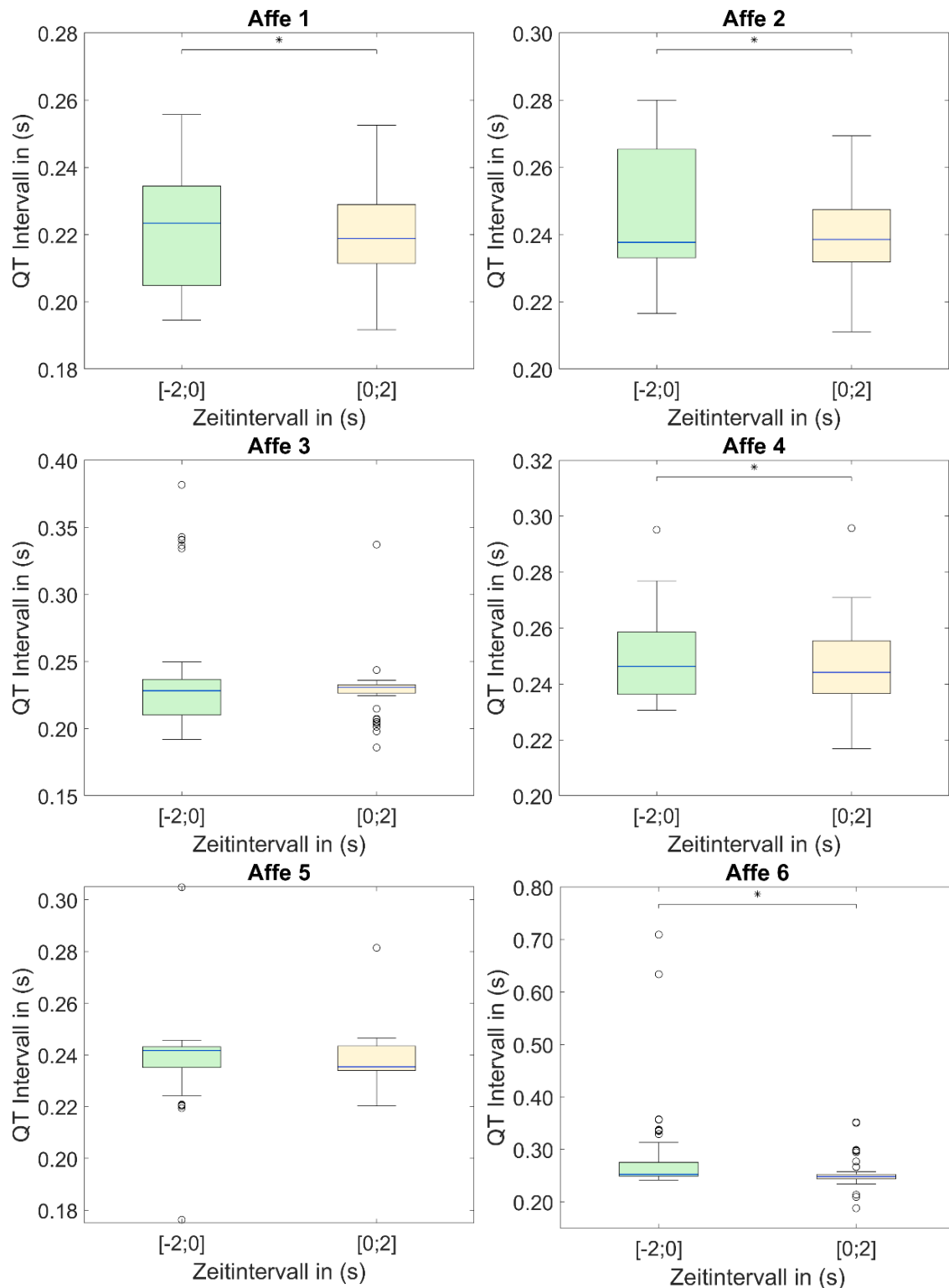


Abbildung 11: Vergleich des QT-Intervalls je Affe vor und nach der Vokalisation
Legende: ■ Mittelwerte im Zeitintervall [-2,0] vor der Vokalisation, ■ Mittelwerte im Zeitintervall [0,2] nach der Vokalisation, — Median, ○ Ausreißer, * $p < 0,05$

3.8 T-Welle

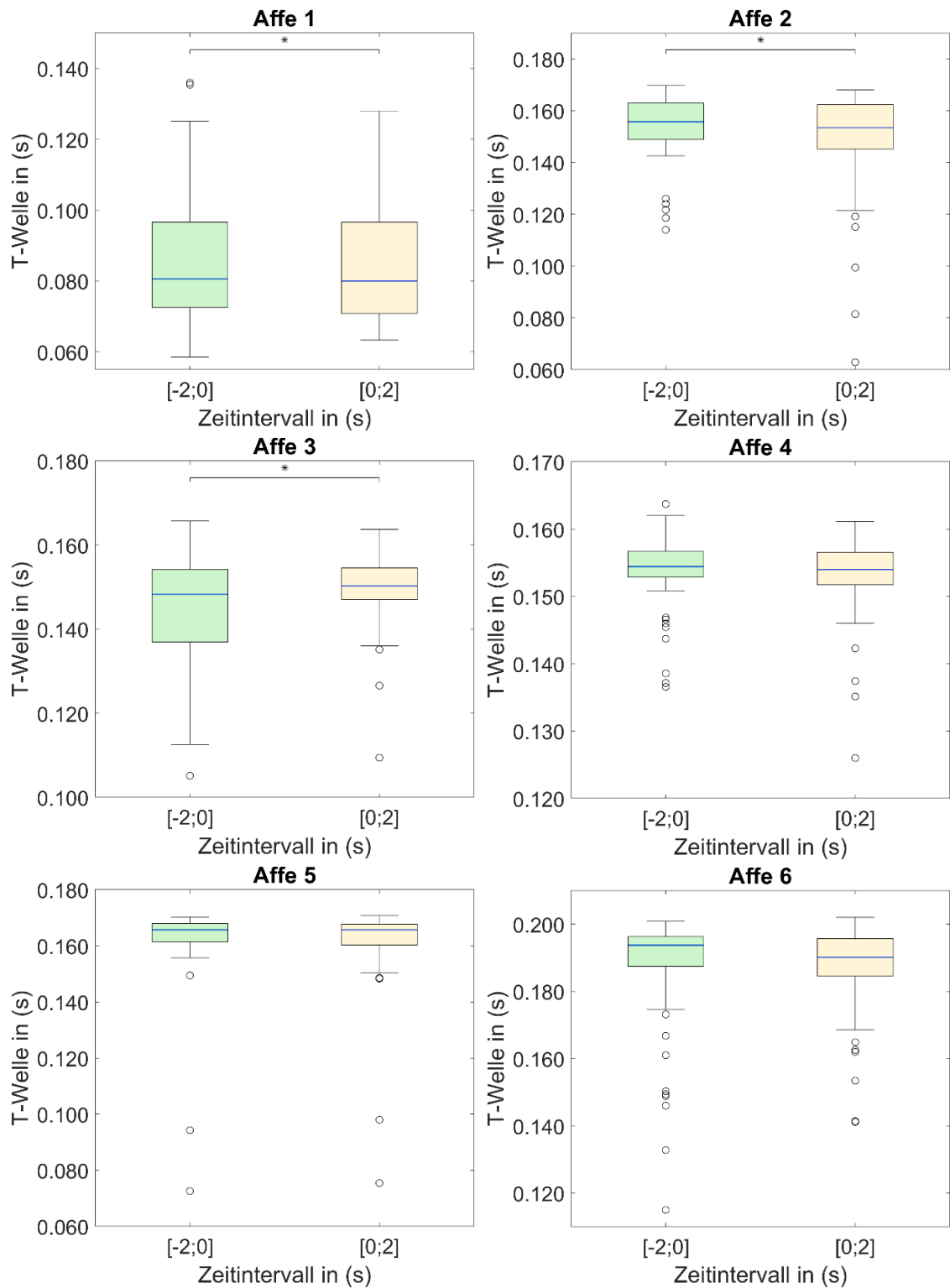


Abbildung 12: Vergleich der T-Welle je Affe vor und nach der Vokalisation.

Legende: ■ Mittelwerte im Zeitintervall [-2,0] vor der Vokalisation, ■ Mittelwerte im Zeitintervall [0,2] nach der Vokalisation, — Median, ○ Ausreißer, * $p < 0,05$

Bei den Box-Plots der T-Welle in Abbildung 12 fällt auf, dass alle männlichen Affen statistisch signifikante Entwicklungen der Mittelwerte im Zeitverlauf aufzeigen: Affe 1 ($p = 0,37e-2$; $n = 93$; Wilcoxon-Test), Affe 2 ($p = 2,72e-05$; $n = 73$; Wilcoxon-Test) und Affe 3 ($p = 0,02$; $n = 63$; Wilcoxon-Test). Dagegen kann die Nullhypothese bei keinem der Weibchen (Affe 4 ($p = 0,17$; $n = 112$; Wilcoxon-Test), Affe 5 ($p = 0,94$; $n = 55$; Wilcoxon-Test) und Affe 6 ($p = 0,66$; $n = 90$; Wilcoxon-Test)) verworfen werden. Die Mittelwerte aller Affen zusammen zeigen eine statistische Signifikanz im beobachteten Zeitraum ($p = 0,45e-2$; $n = 486$; Wilcoxon-Test).

Innerhalb der Geschlechter verhalten sich die Mediane jedoch nicht gleich. Der Median sinkt jeweils bei Affe 1, 2, und 4. Bei Affe 3 steigt dieser im Zeitverlauf an. Bei Affe 5 bleibt der Median mit 0,17 Sekunden konstant. Den niedrigsten Median zeigt Affe 1 mit 0,08 Sekunden im Zeitintervall $[0;2]$. Den höchsten Median erkennt man bei Affe 6 mit 0,19 Sekunden im Zeitintervall $[-2;0]$.

Die Werte reichen von minimal 0,06 Sekunden bei Affe 2 im Zeitintervall $[0;2]$ bis maximal 0,20 Sekunden im Zeitintervall $[2;0]$ bei Affe 6.

3.9 Geschlechter im Überblick

Bei der Betrachtung der p-Werte in der Übersicht in Tabelle 2 ist ersichtlich, dass die männlichen Affen mit dem Wilcoxon-Test insgesamt 14 von 24 signifikante Änderungen der EKG-Parameter zusammen mit der Herzfrequenz im Vergleich der Zeitintervalle von $[-2;0]$ und $[0;2]$ aufzeigen. Die weiblichen Affen weisen wiederum lediglich 9 von 24 signifikante Änderungen auf. Zusätzlich stechen Affe 2 und Affe 5 im Vergleich zwischen Männchen und Weibchen heraus. Affe 2 zeigt, dass nur eine Nullhypothese beim standardmäßigen Signifikanzniveau von 5% nicht abgelehnt wird. Demgegenüber steht der weibliche Affe 5, bei dem nur eine Nullhypothese abgelehnt wird. Es lässt sich hier die Tendenz unterstreichen, dass sich die Parameter der männlichen Affen bei Beginn der Vokalisation ändern, ohne Rücksicht darauf, ob die Medianwerte sinken oder steigen.

Tabelle 2: Überblick zu den p-Werten aller Affen

	Affe 1 männlich	Affe 2 männlich	Affe 3 männlich	Affe 4 weiblich	Affe 5 weiblich	Affe 6 weiblich	Alle Affen
Herz-frequenz	0,09e-1	1,02e-11	0,58	2,68e-07	0,09e-1	0,07e-2	1,97e-19
P-Welle	0,26	1,59e-05	0,02	0,01	0,12	0,66	0,44
PQ-Intervall	0,97	1,49e-07	0,03e-1	0,62	0,30	0,30	0,09
PQ-Strecke	0,25	2,05e-07	1,00	0,04e-1	0,73	0,28	0,03e-2
QRS-Komplex	0,04e-2	0,06e-2	0,30	0,37	0,20	0,21	0,76
ST-Strecke	0,16	0,65	0,42	0,17e-3	0,73	0,03	0,07
QT-Intervall	0,01	0,37e-2	0,90	0,14e-2	0,19	0,12e-2	1,71e-08
T-Welle	0,37e-2	2,72e-05	0,02	0,17	0,94	0,66	0,46e-2

Die Nullhypothese (H0) kann auf dem 5%-Niveau nicht verworfen werden.

Die Nullhypothese (H0) kann auf dem 5%-Niveau verworfen werden.

Die Ergebnisse der getrennten Betrachtung der EKG-Parameter zusammen mit der Herzfrequenz aller männlichen und weiblichen Affen mit Hilfe des Wilcoxon-Tests ist in Tabelle 3 zusammengefasst dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die weiblichen Affen gleich viele signifikante Veränderungen aufweisen wie die männlichen Affen. Sowohl für die P-Welle, das PQ-Intervall als auch für den QRS-Komplex kann bei beiden Geschlechtern die Nullhypothesen nicht verworfen werden. Eine deutliche Signifikanz in der Entwicklung der Mittelwerte zeigt sich bei beiden Geschlechtern bei der Herzfrequenz, sowie bei den Parametern der PQ-Strecke und dem QT-Intervall.

Tabelle 3: p-Werte je Geschlecht

	Alle Affen männlich p-Werte	Alle Affen weiblich p-Werte
Herzfrequenz	4,76e-09	4,98e-11
P-Welle	0,95	0,21
PQ-Intervall	0.35	0,14
PQ- Strecke	0,17e-2	0,015
QRS-Komplex	0,78	0,94
ST- Strecke	0,73	8,24e-05
QT- Intervall	0,19e-2	1,37e-06
T-Welle	0,72e-2	0,29

Die Nullhypothese (H0) kann auf dem 5%-Niveau nicht verworfen werden.
Die Nullhypothese (H0) kann auf dem 5%-Niveau verworfen werden.

Im Folgenden findet die detaillierte Untersuchung des Geschlechtereinflusses statt. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse des zweifaktoriellen ART-ANOVA-Tests für alle Nullhypothesen (H_1 : Zeitraum, H_2 : Geschlecht, H_3 : Zeitraum*Geschlecht) und den anschließenden Post-Hoc-Tests für alle EKG-Parameter sowie der Herzfrequenz zusammengefasst dargestellt. Dabei beschreiben die kombinierten Bezeichnungen (m-/m+/w-/w+) die paarweisen Vergleiche aus männlichen bzw. weiblichen Affen (m/w) vor und nach der Vokalisation (-/+). Insgesamt ergeben sich daraus 6 Kombinationen/Tests, jedoch werden im Folgenden die Ergebnisse der Kombinationen ,w-/m+' und ,w+/m-' nicht weiter betrachtet, da sie für den Geschlechtereinfluss mit Bezug auf die Vokalisation nicht relevant sind. Die paarweisen Vergleiche (,m-/m+' und ,w-/w+') sind entscheidend bei der Betrachtung des Einflusses der Vokalisation, da hierbei die EKG- bzw. Herzfrequenzdaten vor und nach der Vokalisation verglichen werden. Für den generellen Geschlechterunterschied sind die paarweisen Vergleiche (,m-/w-' und ,m+/w+') zu betrachten.

Tabelle 4: Ergebnisse der zweifaktoriellen ART-ANOVA (mit Bonferroni-Korrektur)

	Nullhypothese	p-Wert	p-Wert (Bonferroni-Korr.)
Herzfrequenz	Zeitraum	0,02e-1	
	Geschlecht	2,06e-100	
	Zeitraum*Geschlecht	0,42	
	m-/m+	0,03e-1	0,03e-1
	m-/w-	3,33e-77	3,33e-77
	m+/w+	1,76e-57	1,76e-57
	w-/w+	0,02e-1	0,02e-1
P-Welle	Zeitraum	0,43	
	Geschlecht	0,47	
	Zeitraum*Geschlecht	0,24	
	m-/m+	0,70	0,70
	m-/w-	0,25	0,25
	m+/w+	0,80	0,80
	w-/w+	0,29	0,29
PQ-Intervall	Zeitraum	0,74	
	Geschlecht	5,23e-23	
	Zeitraum*Geschlecht	0,77	
	m-/m+	0,91	0,91
	m-/w-	0,12e-11	0,12e-11
	m+/w+	0,17e-11	0,17e-11
	w-/w+	0,88	0,88
PQ-Strecke	Zeitraum	0,13	
	Geschlecht	0,05e-9	
	Zeitraum*Geschlecht	0,31	
	m-/m+	0,60	0,60
	m-/w-	0,31e-5	0,31e-5
	m+/w+	0,21e-5	0,21e-5
	w-/w+	0,65	0,65

Fortsetzung Tabelle 4

	Nullhypothese	p-Wert	p-Wert (Bonferroni-Korr.)
QRS-Komplex	Zeitraum	0,14	
	Geschlecht	0,08e-3	
	Zeitraum*Geschlecht	0,37	
	m-/m+	0,70	0,70
	m-/w-	0,03	0,03
	m+/w+	0,02	0,02
	w-/w+	0,92	0,92
ST-Strecke	Zeitraum	0,79	
	Geschlecht	1,88e-49	
	Zeitraum*Geschlecht	0,77	
	m-/m+	0,92	0,92
	m-/w-	5,14e-27	5,14e-27
	m+/w+	5,60e-27	5,60e-27
	w-/w+	0,84	0,84
QT-Intervall	Zeitraum	0,01	
	Geschlecht	3,65e-75	
	Zeitraum*Geschlecht	0,40	
	m-/m+	0,02	0,02
	m-/w-	2,61e-42	2,61e-42
	m+/w+	2,83e-43	2,83e-43
	w-/w+	0,02	0,02
T-Welle	Zeitraum	0,20	
	Geschlecht	8,57e-99	
	Zeitraum*Geschlecht	0,54	
	m-/m+	0,38	0,38
	m-/w-	2,79e-55	2,79e-55
	m+/w+	1,53e-57	1,53e-57
	w-/w+	0,60	0,60

Die Nullhypothese kann auf dem 5%-Niveau nicht verworfen werden (o. Bonferroni-Korrektur).

Die Nullhypothese kann auf dem 5%-Niveau verworfen werden (o. Bonferroni-Korrektur).

Die Nullhypothese kann auf dem 0,83%-Niveau nicht verworfen werden (m. Bonferroni-Korrektur).

Die Nullhypothese kann auf dem 0,83%-Niveau verworfen werden (m. Bonferroni-Korrektur).

Die p-Werte der ART-ANOVA sowie der Post-Hoc-Tests werden mit dem standardmäßigen Signifikanzniveau von 0,05 bewertet. Zusätzlich erfolgt die Bewertung der Post-Hoc-Tests mit dem Bonferroni-korrigierten Signifikanzniveau von 0,0083 (6 Tests), um der Alphafehlerkumulierung aufgrund der Anwendung von 6 Tests auf den gleichen Datensatz entgegenzuwirken. Die Ergebnisse in Tabelle 4 können in 5 Gruppen aufgeteilt werden:

1. Herzfrequenz: Alle paarweisen Vergleiche sind vor und nach der Korrektur signifikant.
2. P-Welle: Alle paarweisen Vergleiche zeigen sich vor und nach der Korrektur als nicht signifikant.
3. QRS-Komplex: Vor der Korrektur sind 2 der 4 paarweisen Vergleiche signifikant, durch die Bonferroni-Korrektur keines mehr.
4. QT-Intervall: Vor der Korrektur sind alle paarweisen Vergleiche signifikant. Durch die Korrektur werden zwei paarweise Vergleiche (,m-/m+' und ,w-/w+') nicht-signifikant.
5. PQ-Intervall, PQ-Strecke, ST-Strecke sowie T-Welle: Hier zeigt die Korrektur keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Die paarweisen Vergleiche (,m-/w-' und ,m+/w+') sind signifikant, wohingegen (,m-/m+' und ,w-/w+') nicht-signifikant sind.

Bei der Analyse der Ergebnisse hinsichtlich des standardmäßigen Signifikanzniveaus liegen lediglich bei der Herzfrequenz ($p = 0,02e-1$) und dem QT-Intervall ($p = 0,01$) signifikante Ergebnisse bezüglich des Zeitraums (Messbereichs vor und nach der Vokalisation) vor. Dies wird auch durch die paarweisen Vergleiche ,m-/m+' und ,w-/w+' unterstrichen. Unter Berücksichtigung der Bonferroni-Korrektur bleiben nur noch die Ergebnisse der Herzfrequenz signifikant.

Bei allen EKG-Parametern und der Herzfrequenz, die P-Welle ausgenommen, liegt ein signifikantes Ergebnis bezüglich des Geschlechts bei standardmäßigem Signifikanzniveau vor. Auch hier stimmen die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche (,m-/w-' und ,m+/w+') überein, welche jeweils die geschlechter-spezifischen Daten vor bzw. nach der Vokalisation gegenüberstellen. Durch die Anwendung der Bonferroni-Korrektur verschwindet lediglich die Signifikanz des QRS-Komplexes. Die Ergebnisse zeigen somit eine deutliche Geschlechter-

abhängigkeit einer Vielzahl der EKG-Parameter sowie der Herzfrequenz bei Makaken.

Grundsätzlich zeigen alle EKG-Parameter und die Herzfrequenz bei der Interaktion (Zeitraum*Geschlecht) keine signifikanten Ergebnisse.

Der Vergleich der Ergebnisse des Wilcoxon-Tests aller Affen kombiniert (siehe Tabelle 2 letzte Spalte) mit den Ergebnissen der ART-ANOVA (siehe Tabelle 4, Zeilen Zeitraum) zeigt eine gute Übereinstimmung bei 6 von 8 Parametern. Lediglich bei der PQ-Strecke und bei der T-Welle weist die ART-ANOVA gegenüber dem Wilcoxon-Test kein signifikantes Ergebnis auf.

4 Diskussion

Nachfolgend findet zunächst eine Diskussion der Methoden statt, gefolgt von einer Ergebnisdiskussion, die auch im Kontext der bisherigen Forschung steht. Zudem ist ein Fazit und ein Ausblick für weitere Forschungsaspekte Teil dieses Kapitels.

4.1 Methodendiskussion

Es gab bereits Studien, die eine erhöhte Herzfrequenz beim Sprechen im Zusammenhang mit dem Fall des Parasympathikus oder der Steigerung des Sympathikus stehen aufzeigen (Reilly & Moore, 2003; Weber & Smith, 1990). Bei der Auswertung der vorliegenden Arbeit wurde dieser Aspekt aufgrund der fehlenden Auswertung der Mayer-Wellenfrequenz nicht berücksichtigt. Man kann nur davon ausgehen, dass diese Mayer Wellen Einfluss auf die Herzfrequenz haben (Reilly & Moore, 2003).

Die Herzaktivität ist zum großen Teil direkt abhängig von körperlicher Betätigung, was auch Malinow et al. beschreiben. Beim Sport kann beispielsweise die Herzfrequenz deutlich ansteigen. Auch ist die Herzrate in Ruhe, der sogenannte Ruhepuls, deutlich geringer bei gut ausdauertrainierten Individuen. Dies trifft sowohl auf Menschen als auch auf Affen zu (Malinow et al., 1977; Talan & Engel, 1986). Methodenkritisch muss also bedacht werden, dass die körperlichen Aktivitäten der Affen zwar mit Videokameras aufgezeichnet wurden, nicht jedoch in diese Auswertung der Studie miteingeflossen sind.

Außerdem ist anzumerken, dass nur eine Ableitung des EKGs verwendet wurde. Das PQ-Intervall lässt sich zum Beispiel am besten aus der 2. Ableitung beurteilen, da die initialen Ausschläge von P und QRS genau auf diese Ableitung ausgerichtet sind (Gertsch et al., 2008). Es kann sogar vorkommen, dass in zwei verschiedenen, gleichzeitig registrierten Ableitungen der Beginn von P und QRS bestimmt werden, um ein exaktes Ergebnis zu erhalten (Gertsch et al., 2008). Zusätzlich wird der QRS-Komplex in der frontalen und in der horizontalen Ebene bestimmt. In der frontalen Ableitung hängt die Richtung des QRS-Komplexes

vom Habitus, vom Körpergewicht, vom Alter oder von der Körperposition ab (Gertsch et al., 2008).

Methodenkritisch kann noch hinzugefügt werden, dass die respiratorische Sinusarrhythmie nicht in die Auswertungen mit einbezogen wurde. Eine respiratorische Sinusarrhythmie (RSA) beschreibt eine Anpassung der Herzfrequenz durch Barorezeptoren, welche die Herzfrequenz beim Einatmen steigen und beim Ausatmen sinken lässt. Es ist somit ein Zusammenspiel von Lunge, Herz und dem Kern des Tractus solitarius (Borjon et al., 2016). Laut einer Studie von Reilly im Jahr 2003 zeigten Ergebnisse, dass die respiratorische Sinusarrhythmie beim Vorlesen neben der Zunahme der Atemdauer, des Lungenvolumens sowie der Einatmungsgeschwindigkeit eine vergleichbare Erhöhung der RSA-Amplitude bewirkt. Dies zeigt, dass sensomotorische Bahnen bei der Sprachproduktion bewusst verändert werden können (Reilly & Moore, 2003).

Auch die Bonferroni-Korrektur ist methodenkritisch zu beleuchten. Obwohl zum Beispiel das QT-Intervall im ungefilterten Post-hoc-Vergleich zunächst einen signifikanten Unterschied aufwies (siehe Tabelle 4), verliert dieser Effekt nach Anwendung der Bonferroni-Korrektur seine statistische Signifikanz. Dieses Ergebnis ist jedoch im Licht der bekannten methodischen Einschränkungen der Bonferroni-Methode zu interpretieren. Armstrong kritisiert die Bonferroni-Korrektur insbesondere dafür, dass sie durch die starke Absenkung des Signifikanzniveaus eine übermäßig konservative Teststrategie darstellt und damit die statistische Aussagekraft erheblich reduziert (Armstrong, 2014). Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit, echte Effekte fälschlicherweise zu verwerfen (Erhöhung der Fehlerrate 2. Art), was insbesondere bei biologischen und physiologischen Parametern problematisch sein kann, da hier Zusammenhänge häufig variabel sind. Hinzu kommt, dass Bonferroni die einzelnen Tests als unabhängig voneinander behandelt – eine Annahme, die bei hochkorrelierten kardiologischen Messgrößen wie EKG-Intervallen selten realistisch ist. Armstrong argumentiert daher, dass die Bonferroni-Korrektur in vielen Fällen zu „überkorrigierten“ Ergebnissen führt und potenziell bedeutsame physiologische Unterschiede statistisch unsichtbar macht. Vor diesem Hintergrund ist der Verlust

der Signifikanz beim QT-Intervall vorsichtig zu bewerten und spiegelt möglicherweise eher die methodische Strenge der Korrektur als das Fehlen eines biologischen Effekts wider.

4.2 Ergebnisdiskussion

4.2.1 Herzfrequenz

Bei den Affen 1 und 3 steigt die Herzfrequenz bis über 220 Schläge pro Minute. Der Normbereich liegt bei Makaken bei ca. 150 Schlägen pro Minute, kann jedoch auch auf bis zu 330 Schläge pro Minute ansteigen (Reece, 2015). Faktoren wie psychischer Stress, der die Herzfrequenz unter normalen Bedingungen steigen lässt und welcher durch das sympathische und parasympathische Nervensystem beeinflusst wird, kann bei einer erhöhten Herzfrequenz ebenso nicht ausgeschlossen werden. Dies verdeutlicht auch eine Studie an Rhesusaffen, welche einen Anstieg der Sympathikusaktivität durch psychisch belastende oder emotional bedeutsame Reize zeigt und sich somit die Herzphysiologie ändert (Bliss-Moreau et al., 2013). Auch Baroreflex-vermittelte Veränderungen können die Herzfrequenz beeinflussen (Reutersberg et al., 2022). Der arterielle Baroreflex ist einer der bedeutendsten Mechanismen zur Aufrechterhaltung des Kreislaufsystems und dessen Gleichgewicht (Levy, 1997; Okada et al., 2012; Reutersberg et al., 2022). Veränderungen des Blutdrucks werden durch spezifische mechanosensorische Proteine, sogenannte Barorezeptoren, erfasst, die sich insbesondere im *Sinus caroticus* und im Aortenbogen befinden (Reutersberg et al., 2022). Das Signal wird über die afferenten Nerven zum Zentralnervensystem weitergeleitet und dient als negative Rückmeldung der Herzfrequenz (Hainsworth, 2014; Lau et al., 2016). Der kardiale Sinusknoten (SAN) reguliert die Herzfrequenz, welcher vom sympathischen und parasympathischen autonomen Nervensystem innerviert wird (Reutersberg et al., 2022). Dabei wird das R-R-Intervall verändert (Reutersberg et al., 2022). Dies zeigt auch eine Studie an Javaneraffen. Mit elektrischer Stimulation des Vagusnervs und selektiven Denervationsmanövern konnte gezeigt werden, dass parasympathische Fasern gezielt den Sinusknoten erreichen und seine Aktivität modulieren (Billman et al., 1989).

Linden und Lynch et al. (Linden, 1987; Lynch et al., 1980) berichteten, dass die menschliche Sprachproduktion mit deutlichen kardiovaskulären Veränderungen einhergeht. Insbesondere zeigte die Untersuchung von Lynch et al., dass sowohl der systolische als auch der diastolische Blutdruck während zwischenmenschlicher Kommunikation rasch ansteigen können. Zudem kann die Herzfrequenz gemeinsam mit dem Blutdruck bereits innerhalb von etwa 30 Sekunden nach Beginn des Sprechens um mehr als 20 % zunehmen (Lynch et al., 1980).

Bei vier von sechs Affen steigt der Median der Herzfrequenz. Dies ist eine klare Tendenz, dass spontane Lautäußerungen mit einem perivokalen physiologischen Anstieg der Herzfrequenz in Zusammenhang stehen kann. Sowohl die Mittelwertentwicklung aller Affen als auch fünf Affen einzeln betrachtet weisen eine signifikante Änderung auf. Für den ersten Affen, der von ihnen als einziges eine signifikant sinkende Herzfrequenz aufweist, kommen die oben diskutierten Faktoren als naheliegende Erklärung in Frage. Auffällig ist, dass die Affen 1 und 3 eine deutlich höhere Herzfrequenz haben als die anderen Affen – es handelt sich auch um die beiden Affen, die keinen Anstieg der Herzfrequenz nach der Lautäußerung aufweisen. Sie starten bereits auf einem wesentlich höheren Niveau, was die Interpretation der Daten erschwert. Hier wäre sicherlich interessant, ob noch andere Ursachen vorliegen, welche zu einer erhöhten Herzfrequenz führen können (z.B. körperliche Aktivität, Stress, etc.).

Die feststellbare Tendenz, dass sich die Herzfrequenz nach Lautäußerungen erhöht, deckt sich auch mit der bereits vorliegenden Literatur (Lynch et al., 1980; Peters, 1984; Reilly & Moore, 2003; Weber & Smith, 1990). Nach der Studie von Borjon et al. im Jahr 2016 zeigt die Herzfrequenz einen stetigen Anstieg 23 Sekunden vor dem Beginn der Vokalisation, gefolgt von einer starken Verlangsamung der Herzfrequenz, welche ca. 8 Sekunden andauert (Borjon et al., 2016). Nach Risueno-Segovias Studie zeigt die Herzfrequenz einen Anstieg ein paar Sekunden vor der Vokalisation mit einem Maximum ca. 4 Sekunden nach der Stimmproduktion (Risueno-Segovia et al., 2022). Die vorliegende Untersuchung zeigt bei den Mittelweltergebnissen aller Affen einen Anstieg der Herzfrequenz von 151 Schläge pro Minute vor der Lautäußerung auf 154 Schläge

pro Minute nach der Lautäußerung im untersuchten Zeitintervall von [-2;2] Sekunden. Beim Vergleich der Studien muss berücksichtigt werden, dass es sich bei Borjon et al. (Borjon et al., 2016) um Marmosetten (*Callitrichini*) handelt, wohingegen die anderen zwei Studien Makaken untersuchen. Dies kann zu unterschiedlichen Zeitangaben führen, auch wenn alle Studien belegen, dass sich die Herzfrequenz erhöht, sobald die Affen vokalisieren.

Unklar ist, welche Aspekte der Sprache zum Anstieg der Herzfrequenz führen. Während beim Menschen die Kommunikation auf inhaltlicher Ebene Gefühle und damit auch die Herzparameter stark beeinflussen kann, ist unklarer, welche Auswirkung die Kommunikation der Affen auf das jeweilige Individuum hat. Fraglich ist, welche Wahrnehmung der vokalisierende Affe von sich selbst hat und wie seine Lautäußerung von anderen Individuen aufgenommen wird. Schließlich geht man davon aus, dass nur der Mensch in der Lage ist über seine entwickelte Sprache regelbasiert und inhaltlich zu kommunizieren. Jedoch kann ein Makake durch seine einfachere Kommunikation auch Emotionen oder Reaktionen hervorrufen, was sich wiederum auf die Herzfrequenz auswirken kann (Kaczmarek et al., 2019; Zhu et al., 2019).

4.2.2 EKG-Parameter

Bei Betrachtung der P-Welle zeigt sich eine Tendenz, dass sich die Dauer verlängert, sobald die Affen anfangen zu vokalisieren. Bei 4 von 6 Affen vergrößert sich der Median im untersuchten Zeitintervall. 2 von diesen 4 Affen zeigen statistisch signifikante Ergebnisse. Die Dauer der P-Welle wird von der Herzfrequenz beeinflusst, jedoch weniger stark als andere Parameter wie zum Beispiel das PQ-Intervall oder das QT-Intervall (Toman et al., 2020). Eine Erklärung der verkürzten Dauer der P-Welle liegt in der steigenden Herzfrequenz. Da sich bei den vorliegenden Messergebnissen die Mediane der P-Welle vergrößern, kann dies jedoch auch ein Hinweis auf ein geändertes Verhalten der P-Welle beim Beginn der Vokalisation geben. Andere Faktoren wie der Amplitudenausschlag haben keinen Einfluss auf die hier gemessenen Werte. Es ist möglich, aus der Amplitude in der Klinik eine eventuelle Pathologie abzuleiten (Gertsch et al., 2008), jedoch sind in der untersuchten Studie alle Affen gesund. In der aktuellen Literatur zeigt Yamaoka et al. (Yamaoka et al., 2013), dass die

Dauer der P-Welle Mittelwerte zwischen $0,037 \pm 0,018$ Sekunden bei männlichen Japanmakaken (*Macaca fusucata*) und $0,041 \pm 0,018$ Sekunden bei weiblichen Japanmakaken erreichen. Im Vergleich werden in der Studie von Yamaoka et al. ebenso Werte von $0,05 \pm 0,007$ Sekunden von Javaneraffen (*Macaca fascicularis*) angegeben, die sich mit unseren Medianwerten (0,04 - 0,06 Sekunden) decken. Ein Unterschied zwischen diesen Studien liegt jedoch in der Art der Affenhaltung bei der Datenerfassung. Während bei Yamaoka et al. die Affen mit Ketaminhydrochlorid sediert werden, können sich die Affen bei der vorliegenden Arbeit frei bewegen. Gewicht und Alter sind in beiden Studien durchschnittlich deckend. Die verkürztere P-Welle bei Yamaoka et al. ist wahrscheinlich auf die Affenart und die Narkose zurückzuführen.

Das PQ-Intervall ist anhängig von der Herzfrequenz, auch wenn der Zusammenhang gering und die physiologische Ursache unklar ist (Toman et al., 2020). Da bei vier Affen der Median der Herzfrequenz steigt, sollten somit die Ergebnisse eine Verkürzung des PQ-Intervalls versprechen. Der Median steigt bei der Hälfte der Affen an (3,4 und 6). Bei der anderen Hälfte der Affen sinkt dieser (Affe 1,2 und 5). Bei den Affen 2 und 5 verhält sich das PQ-Intervall abhängig von der Herzfrequenz, da hier die Herzfrequenz steigt und das PQ-Intervall schneller abläuft. Affe 2 zeigt statistisch signifikante Ergebnisse, jedoch ist 1 von 6 Affen nicht ausreichend, um diese Anhängigkeit zu unterstreichen. Vielmehr zeigen die Affen durch ihre PQ-Intervallwerte eine Tendenz, dass sobald eine Vokalisation beginnt, die Mediane auch unabhängig von der Herzfrequenz langsamer werden können.

Die PQ-Strecke stellt im EKG eine Nulllinie dar (Behrends et al., 2017). Eine kurze PQ-Strecke kann direkt mit einer gesteigerten Herzfrequenz zusammenhängen (Friese, 1961). Wird die Strecke kleiner, kann die nächste Herzaktion früher ablaufen, was zur gesteigerten Herzfrequenz beitragen kann. Wie auch die Herzfrequenz, ändert sich die PQ-Strecke bei zwei Affen im untersuchten Zeitintervall statistisch signifikant. Die gemessenen Einzelwerte der Affen 2 und 4, welche die signifikante Mittelwertänderung aufzeigen, sinken jeweils. Dies passt auch zu den Ergebnissen der gesteigerten Herzfrequenz im Zeitraum während der Vokalisation. Da Risueno-Segovia in ihrer Studie einen

steigenden Blutdruck im untersuchten Zeitintervall ansteigt (Risueno-Segovia et al., 2022), liegt eine mögliche Erklärung vor, wie die Herzkammern in der gemessenen Zeit schneller und effektiver für die nächste Herzaktion gefüllt werden. Auch Affe 1 und 3 weisen sinkende Mediane auf, welche jedoch keine Signifikanz zeigen. Somit ist eine Tendenz für eine verkürzte PQ-Strecke, sobald die Affen vokalisieren nicht auszuschließen.

Der QRS-Komplex zeigt bei dem Vergleich der Ergebnisse der Zeitintervalle $[-2;0]$ und $[2;0]$ konstante Werte. Bei den Affen 2, 3, 4, 5 und 6 sinkt der Median, obgleich sie sich minimal verändern. Dies zeigt, dass sich der QRS-Komplex zwar verkürzt, sich jedoch nicht ausschlaggebend verändert, sobald eine Vokalisation stattfindet. Somit kann man nur eine schwache bis keine Korrelation zwischen Vokalisation und QRS-Komplex vermuten. Wie bereits erwähnt reichen die Mediane von 0,049 Sekunden bis 0,054 Sekunden. In der Studie von Yamaoka et al. (Yamaoka et al., 2013) liegen die Werte um die 0,044 Sekunden bei Japanmakaken, bei Javaneraffen sogar nur bei ca. 0,036 Sekunden. Bei Menschen dauert der QRS-Komplex in der Regel 0,050 – 0,090 Sekunden (Behrends et al., 2017) und kann somit deutlich länger ablaufen als bei Affen. Yamaoka et al. vermuten ein verdünntes Myokard bei Makaken, was den Unterschied zum Menschen erklärt, wenngleich der QRS-Komplex sich verlängert, sobald die männlichen Affen älter werden. Hier wird eine Verdickung des Herzmuskels im Alter und im Wachstum begründet (Yamaoka et al., 2013). Dies erschwert den Vergleich des QRS-Komplexes zwischen Menschen und Affen, um eine mögliche Korrelation festzustellen.

Die ST-Strecke zeigt tendenziell leicht verkürzte Werte nach dem Beginn der Vokalisation. So sinkt bei 3 Affen der Median, wobei nur davon Affe 4 statistisch signifikante Ergebnisse liefert. Die ST-Strecke ist abhängig von der Herzfrequenz. Somit sollte sich die Dauer der ST-Strecke verkürzen. In der vorliegenden Studie vergrößert sich die Herzfrequenz bei fast allen Affen. Das erklärt auch die verkürzte ST-Strecke bei 3 von 6 Affen.

Auch das QT-Intervall ist abhängig von der Herzfrequenz (Gertsch et al., 2008). Bei Affe 2 und 3 steigt der Median nach Beginn der Lautäußerung im untersuchten Zeitintervall von $[-2;2]$ Sekunden. Vergleichbar mit den anderen

Parametern, die einen direkten Zusammenhang mit der Herzfrequenz haben, sinken die Mediane der QT-Intervalle im Zeitverlauf bei den anderen 4 Affen. Eine Ausnahme stellt Affe 2 dar, bei welchem der Median des QT-Intervalls signifikant ansteigt. Die Herzfrequenz von Affe 2 nimmt nach Vokalisation jedoch zu, was dem Zusammenhang zwischen Herzfrequenz und QT-Intervall widerspricht. Eine mögliche Erklärung kann ein erhöhter Vagotonus sein, der die ventrikuläre Repolarisation moduliert. Tierexperimentelle Untersuchungen an telemetrierten Marmosetten zeigen, dass ein gesteigerter parasymphathischer Tonus mit einer verlängerten frequenzkorrigierten QT-Zeit (QTc) einhergeht, selbst wenn die Herzfrequenz steigt. Wird der vagale Einfluss pharmakologisch blockiert, nimmt die Verlängerung des QTc ab. Dies weist darauf hin, dass ein erhöhter Vagotonus die typische Beziehung zwischen Herzfrequenz und QT-Intervall verändern kann (Honda et al., 2013).

Die Ergebnisse für die Entwicklung der T-Welle sind schwierig zu interpretieren. Da der Übergang von ST-Strecke in den Beginn der T-Welle fließend ist, handelt es sich um einen schwierig zu bestimmenden Anfangspunkt im EKG (Han et al., 2022). Messungenauigkeiten können hier schwieriger ausgeschlossen werden als bei den anderen Parametern. Die Ergebnisse der Affen weisen Unterschiede auf. Während alle männlichen Affen signifikante Veränderungen der T-Welle bei Beginn der Vokalisation aufweisen, zeigt kein weiblicher Affe eine Signifikanz. Darüber hinaus ist bei den männlichen Affen keine klare Tendenz zu erkennen, ob sich die T-Welle verlängert, verkürzt oder gleichbleibt.

4.2.3 Geschlechtereinfluss

Die Ergebnisse zeigen, dass Männchen und Weibchen im direkten Geschlechtervergleich die gleiche Anzahl an signifikanten Ergebnissen aufweisen, ungeachtet davon, ob die Medianwerte sinken oder steigen. Bei 6 von 8 EKG-Parametern zusammen mit der Herzfrequenz zeigen sowohl weibliche als auch männliche Affen signifikante Unterschiede mit Beginn der Vokalisation (siehe Tabelle 3). Werden alle Affen einzeln sowie zusammengefügt betrachtet (siehe Tabelle 2), zeigen die Männchen durch ihre Anzahl an signifikanten Ergebnissen eine deutlichere Tendenz, dass sich die Mittelwerte mit dem Beginn der Lautäußerung ändern. Es lassen sich ebenfalls Unterschiede zwischen den

Geschlechtern erkennen. Bei allen männlichen Affen entwickelt sich die T-Welle signifikant mit Beginn der Vokalisation, wohingegen kein weiblicher Affe eine signifikante Veränderung zeigt. Im Fall der ST-Strecke ist dies umgekehrt. Hier weisen zwei weibliche Affen eine signifikante Entwicklung auf, jedoch kein männlicher Affe (siehe Tabelle 2).

Auffallend ist eine signifikante Mittelwertänderung sowohl der Herzfrequenz als auch der PQ-Strecke und des QT-Intervalls im Geschlechtervergleich, welche im direkten Zusammenhang mit der Herzfrequenz stehen (siehe Tabelle 3). Dies spricht einerseits für eine Gemeinsamkeit der Geschlechter, andererseits nach der Auswertung der ART-ANOVA auch für eine statistisch signifikante Interaktion zwischen dem Geschlecht des Affen und dem Messbereich vor und nach der Vokalisation. Hier weisen nur die Herzfrequenz und das QT-Intervall signifikante Ergebnisse auf (siehe Tabelle 4). Aufgrund des strengeren Signifikanzniveaus der Bonferroni-Methode zeigt das QT-Intervall nach dem Post-hoc-Test keine Signifikanz mehr auf.

In der Literatur lassen sich allgemeine Unterschiede zwischen Männchen und Weibchen finden. Bei nichtmenschlichen Primaten zählen einige externe Faktoren dazu, welche den Zeitpunkt und die Wahrscheinlichkeit einer Lautäußerung beeinflussen (Seyfarth & Cheney, 2003). Dazu zählen unter anderem die Entfernung zu Artgenossen (Borjon et al., 2016; Choi et al., 2015; Fischer et al., 2001) oder auch das Hören von Rufen einer bestimmten Person (Borjon et al., 2016; Ghazanfar et al., 2001; Takahashi et al., 2013). Andere Quellen zeigen ein deutlich unterschiedlicheres Bild bei dem Vergleich von der Herzfrequenz oder den EKG-Parametern zwischen männlichen und weiblichen Affen. Für die Herzfrequenz liegen inzwischen belastbare Hinweise für systematische Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Tieren bei bestimmten Arten vor. Besonders gut dokumentiert ist dies beim Schimpansen. Eine aktuelle Studie an wachen, nicht-anästhesierten Affen zeigt eine im Durchschnitt deutlich höhere Herzfrequenz bei erwachsenen Weibchen im Vergleich zu Männchen, die auch nach Kontrolle von Alter und Tageszeit signifikant bestehen bleibt. So beträgt die Herzfrequenz bei erwachsenen Männchen im Mittel 86,5 bpm, bei Weibchen 106,4 bpm (Hirata et al., 2024).

Diese Daten sprechen für geschlechtsbezogene Einflüsse auf die autonome Regulation des Herz-Kreislauf-Systems bei dieser Art und liefern einen Hinweis auf geschlechtsspezifische Unterschiede in der Herzfrequenz bei einer nicht-menschlichen Primatenart. Auch in der vorliegenden Untersuchung zeigt die Auswertung mit der ART-ANOVA einen statistisch signifikanten Geschlechtsunterschied bei der Herzfrequenz (siehe Tabelle 4), wobei die Werte der Herzfrequenz bei den Männchen im Allgemeinen höher liegen als bei den Weibchen (siehe Abbildung 5).

Ein solcher Effekt lässt sich jedoch nicht auf alle Primaten übertragen. Bei Makaken wurden weder in Ruhe noch unter beta-adrenerger Stimulation Unterschiede in der Herzfrequenz zwischen Männchen und Weibchen beobachtet (Takagi et al., 2003). Die Studie untersuchte dabei gezielt Stress- und Botenstoff-Reaktionen, nicht die Ruheherzfrequenz. Die Heterogenität der Befunde deutet darauf hin, dass artspezifische Physiologie, Hormonstatus, Sozialstruktur und Messbedingungen (anästhesiert vs. wach, Stresslevel, Umgebung) die Herzfrequenz stark beeinflussen. Auch bei Schimpansen betonen die Autoren, dass Tageszeit und Alter berücksichtigt werden müssen (Hirata et al., 2024).

Für die EKG-Parameter ergibt sich hingegen ein deutlich ernüchterndes Bild. Die wenigen verfügbaren Studien, die geschlechtsspezifische EKG-Vergleiche bei Affen vorgenommen haben, berichten nahezu durchgehend keine signifikanten Unterschiede. Dies zeigt sich beispielsweise bei Kapuzineraffen, bei denen P-Wellen-Dauer, PR-Intervall, QT-Intervall sowie P- und R-Wellen-Amplitude unter kontrollierten Bedingungen aber unter Narkose (Ketamin/Midazolam) gemessen wurden. Kein einziger dieser Parameter unterschied sich signifikant zwischen Männchen und Weibchen (de Souza et al., 2018). Auch bei Totenkopfaffen wurden keine konsistenten geschlechtsbezogenen Differenzen in EKG- oder echokardiographischen Parametern beschrieben (Huss et al., 2015). Gleichzeitig existieren für andere Arten, zum Beispiel Rhesusaffen, umfangreiche echokardiographische Datensätze, die deutliche strukturelle Unterschiede (z. B. Herzvolumina) zwischen den Geschlechtern dokumentieren, jedoch keine entsprechenden EKG-Unterschiede aufzeigen, weil diese nicht systematisch

untersucht, wurden (Florio et al., 2024). In der vorliegenden Untersuchung zeigen 6 EKG-Parameter (P-Welle, PQ-Intervall, PQ-Strecke, QRS-Komplex, ST-Strecke, QT-Intervall und T-Welle) statistisch signifikante Geschlechtsunterschiede auf (siehe Tabelle 4) und unterstreichen somit einen Geschlechtsunterschied, der auch die EKG-Parameter betrifft.

4.3 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich über die gemessenen Parameter eine gewisse Tendenz feststellen. So zeigen bei der P-Welle, der T-Welle und dem QT-Intervall mindestens 3 von 6 Affen statistisch signifikante Ergebnisse. Eine schwach positive Korrelation ist somit zu erkennen. Das PQ-Intervall, die PQ-Strecke, die ST-Strecke und der QRS-Komplex können jeweils nur bei 2 Affen eine Signifikanz der Mittelweltergebnisse vorweisen, was einen Zusammenhang von Vokalisation und Sprache nicht eindeutig belegt. Eine eindeutige Korrelation findet zwischen der Vokalisation und der Herzfrequenz statt. Hier können 5 von 6 Affen die Nullhypothese verwerfen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der bisherigen Forschung wie bereits im Kapitel 4.2 diskutiert.

Die Auswertung des Geschlechtervergleichs mithilfe der ART-ANOVA weist bei den meisten EKG-Parametern signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede auf und deutet damit auf physiologische Differenzen zwischen männlichen und weiblichen Affen hin. Der Einfluss der Vokalisation zeigt sich ausschließlich bei der Herzfrequenz und ist sowohl bei männlichen als auch bei weiblichen Tieren signifikant.

Diese Ergebnisse eröffnen somit neue Einblicke in die Rolle physiologischer Parameter bei der Steuerung spontaner Lautäußerungen. Sie weisen auf eine physiologische Verbindung zwischen spontaner Stimmbildung und dem Herz-Kreislauf-System hin und ermöglichen es, neue Fragestellungen zur willentlichen Kontrolle der Stimme bei nichtmenschlichen Primaten zu untersuchen. Aktuelle Studien an Rhesusaffen und Marmosetten zeigen, dass diese Tiere in der Lage sind, spontan als Reaktion auf gezielte visuelle Reize zu vokalisieren (Hage & Nieder, 2013; Pomberger et al., 2019). In der Zukunft muss in der Forschung nun geklärt werden, wie Affen dieses motivationsgesteuerte Verhalten gezielt steuern

können und ob dabei eine direkte Beeinflussung kardiorespiratorischer Prozesse erfolgt. Auch eine Evidenzlücke bei EKG-Parametern im Geschlechtervergleich sollte geschlossen werden. Für die Herzfrequenz gibt es klare, wenn auch artspezifische Hinweise auf Geschlechtsunterschiede, während für EKG-Parameter bislang keine belastbaren geschlechtsspezifischen Unterschiede nachgewiesen wurden. Hier bieten sich neue Studien mit größeren Messdatenumfängen an, die auch weitere Einflussfaktoren wie beispielsweise Stress, körperliche Aktivität oder den Gemütszustand berücksichtigen.

5 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht den Zusammenhang zwischen spontanen Lautäußerungen und kardiovaskulären Parametern bei Makaken (*Macaca fascicularis*). Frühere Untersuchungen (Risueno-Segovia et al., 2022) zeigten, dass Vokalisationen mit physiologischen Veränderungen wie erhöhter Herzfrequenz, gesteigerter motorischer Aktivität und verstärkter 0,15-Hz-Mayer-Wellenleistung einhergehen. Insbesondere treten beim Beginn einer Lautäußerung deutliche Herzfrequenzanstiege auf, was auf eine Beteiligung kardiorespiratorischer Mechanismen bei der Stimmauslösung und -vorhersage hinweist. Ziel der aktuellen Studie ist es, EKG-Parameter wie Herzfrequenz, P-Welle, PQ-Intervall, PQ-Strecke, QRS-Komplex, ST-Strecke, QT-Intervall und T-Welle quantitativ zu analysieren. Dabei wird untersucht, ob sich diese Parameter im Zeitraum von zwei Sekunden vor bis zwei Sekunden nach einer Lautäußerung verändern, um mögliche physiologische Zusammenhänge zwischen Herz-Kreislauf-System und spontaner Stimmbildung aufzuzeigen. Die Ergebnisse sollen zur besseren Verständigung der evolutionären Grundlagen menschlicher Sprache beitragen.

Dabei wurden in zwei getrennten Käfigen, welche in Sicht- und Hörweite gegenüberstanden, jeweils drei männlich und drei weibliche Makaken gehalten. Die Lautäußerungen der Affen wurden akustisch aufgezeichnet, ebenso wie die EKG-Signale eines zuvor implantierten EKG-Telemetriesystems. Insgesamt wurden in einer Zeit von 45 Minuten 486 Laute aufgezeichnet und ausgewertet. Für jeden Parameter des EKGs wurden für das jeweilige Zeitintervall von $[-2;0]$ und von $[0;2]$ ein Mittelwert für jeden einzelnen Parameter des jeweiligen Affen gebildet. Somit lassen sich die Mittelwerte vor und nach der Vokalisation vergleichen.

Signifikante Änderungen nach Lautäußerung ergaben sich sowohl bei männlichen als auch bei weiblichen Makaken für die Entwicklung der Mittelwerte der Herzfrequenz, des QT-Intervalls und der P- und T-Welle. Damit lässt sich für diese Werte mit großer Wahrscheinlichkeit ein Zusammenhang zwischen Vokalisation und der Veränderung der genannten Parameter vorhersagen.

Die Entwicklung der T-Welle war dagegen lediglich bei männlichen Makaken signifikant in ihrer Entwicklung, wohingegen die Veränderung der ST-Strecke im Zeitverlauf nur bei zwei weiblichen Makaken eine signifikante Unterscheidung der Mittelwerte im untersuchten Zeitintervall aufzeigte.

Beim QRS-Komplex, dem PQ-Intervall und PQ-Strecke sowie der ST-Strecke lässt sich kein Zusammenhang zur Lautäußerung feststellen.

Die Analyse des Geschlechtervergleichs mit der ART-ANOVA zeigt bei der Mehrheit der EKG-Parameter signifikante, geschlechtsspezifische Unterschiede, die auf eine unterschiedliche Physiologie zwischen männlichen und weiblichen Affen hinweisen. Der Einfluss der Vokalisation begrenzt sich lediglich auf die Herzfrequenz und ist sowohl bei männlichen sowie weiblichen Affen signifikant.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Beobachtung der Herzfrequenz die interessantesten Ergebnisse zeigt. So steigt bei vier von sechs Affen die Herzfrequenz nach der Vokalisation. Die ansteigende Herzfrequenz bei den vier Affen lässt sich auch statistisch mit signifikant erhöhten Mittelwerten nach der Vokalisation belegen. Insgesamt steigt der Median der Herzfrequenz aller Affen von 151 Schläge pro Minute vor der Lautäußerung auf 154 Schläge pro Minute an. Dahingehend zeigen das QT-Intervall sowie die P- und T-Welle lediglich eine schwach positive Korrelation. Hier sind die Mittelweltergebnisse von mindestens 3 von 6 Affen statistisch signifikant. Das PQ-Intervall, die PQ-Strecke, die ST-Strecke und der QRS-Komplex weisen keinen Zusammenhang und haben nur bei 2 von 6 Affen signifikante Ergebnisse.

6 Literaturverzeichnis

- Armstrong, R. A. (2014). When to use the Bonferroni correction. *Ophthalmic Physiol Opt*, 34(5), 502-508. doi:10.1111/opo.12131
- Aumüller, G., Aust, G., & Engele, J. (2014). *Anatomie* (3., aktualisierte Auflage ed.). Stuttgart: Thieme. doi:10.1055/b-002-99154
- Balezeau, F., Wilson, B., Gallardo, G., Dick, F., Hopkins, W., Anwander, A., . . . Petkov, C. I. (2020). Primate auditory prototype in the evolution of the arcuate fasciculus. *Nat Neurosci*, 23(5), 611-614. doi:10.1038/s41593-020-0623-9
- Behrends, J. C., Bischofberger, J., Deutzmann, R., Ehmke, H., Frings, S., Grissmer, S., . . . Wischmeyer, E. (2017). *Physiologie* (J. C. Behrends, J. Bischofberger, R. Deutzmann, H. Ehmke, S. Frings, S. Grissmer, M. Hoth, A. Kurtz, J. Leipziger, F. Müller, C. Pedain, J. Rettig, C. Wagner, & E. Wischmeyer, Trans. 3., vollständig überarbeitete Auflage ed.). Stuttgart: Thieme. doi:10.1055/b-004-132217
- Billman, G. E., Hoskins, R. S., Randall, D. C., Randall, W. C., Hamlin, R. L., & Lin, Y. C. (1989). Selective vagal postganglionic innervation of the sinoatrial and atrioventricular nodes in the non-human primate. *J Auton Nerv Syst*, 26(1), 27-36. doi:10.1016/0165-1838(89)90104-5
- Bliss-Moreau, E., Machado, C. J., & Amaral, D. G. (2013). Macaque cardiac physiology is sensitive to the valence of passively viewed sensory stimuli. *PLoS One*, 8(8), e71170. doi:10.1371/journal.pone.0071170
- Borjon, J. I., Takahashi, D. Y., Cervantes, D. C., & Ghazanfar, A. A. (2016). Arousal dynamics drive vocal production in marmoset monkeys. *J Neurophysiol*, 116(2), 753-764. doi:10.1152/jn.00136.2016
- Bowling, D. L., Dunn, J. C., Smaers, J. B., Garcia, M., Sato, A., Hantke, G., . . . Fitch, W. T. (2020). Rapid evolution of the primate larynx? *PLoS Biol*, 18(8), e3000764. doi:10.1371/journal.pbio.3000764
- Choi, J. Y., Takahashi, D. Y., & Ghazanfar, A. A. (2015). Cooperative vocal control in marmoset monkeys via vocal feedback. *J Neurophysiol*, 114(1), 274-283. doi:10.1152/jn.00228.2015
- de Souza, A. B., Rodrigues, R. P. S., Pessoa, G. T., da Silva, A. B., Moura, L. S., Sousa, F. C., . . . Alves, F. R. (2018). Standard Electrocardiographic Data from Capuchin Monkeys (*Cebus apella*, Linnaeus, 1758). *J Am Assoc Lab Anim Sci*, 57(1), 13-17.
- Dujardine, E. (2004). *Vocalization-related afferents to the midbrain periaqueductal grey in squirrel monkeys*. Tierärztliche Hochschule, Hannover.
- Eliades, S. J., & Miller, C. T. (2017). Marmoset vocal communication: Behavior and neurobiology. *Dev Neurobiol*, 77(3), 286-299. doi:10.1002/dneu.22464
- Fischer, J., Hammerschmidt, K., Cheney, D. L., & Seyfarth, R. M. (2001). Acoustic Features of Female Chacma Baboon Barks. *Ethology*, 107(1), 33-54. doi:10.1111/j.1439-0310.2001.00630.x
- Fitch, W. T., de Boer, B., Mathur, N., & Ghazanfar, A. A. (2016). Monkey vocal tracts are speech-ready. *Sci Adv*, 2(12), e1600723. doi:10.1126/sciadv.1600723

- Florio, M. C., Fusini, L., Tamborini, G., Morrell, C., McDonald, A., Walcott, M., . . . Capogrossi, M. C. (2024). Echocardiographic characterization of age- and sex-associated differences in cardiac function and morphometry in nonhuman primates. *Geroscience*, 46(5), 4615-4634. doi:10.1007/s11357-024-01172-6
- Friese, G. (1961). *Differentialdiagnose der Herzstromkurve* (G. Friese, Trans.). Berlin ; Heidelberg [u.a.]: Springer.
- Fukuta, H., & Little, W. C. (2008). The cardiac cycle and the physiologic basis of left ventricular contraction, ejection, relaxation, and filling. *Heart Fail Clin*, 4(1), 1-11. doi:10.1016/j.hfc.2007.10.004
- Gertsch, M., Steinbeck, G., & Fässler, B. (2008). *Das EKG auf einen Blick und im Detail ; mit 54 Tabellen H1 - Universitätsbibliothek H2 - AR 108/125* (2. Aufl. ed.). Heidelberg: Springer Medizin Verl.
- Ghazanfar, A. A., Flombaum, J. I., Miller, C. T., & Hauser, M. D. (2001). The units of perception in the antiphonal calling behavior of cotton-top tamarins (*Saguinus oedipus*): playback experiments with long calls. *J Comp Physiol A*, 187(1), 27-35. doi:10.1007/s003590000173
- Grijseels, D. M., Prendergast, B. J., Gorman, J. C., & Miller, C. T. (2023). The neurobiology of vocal communication in marmosets. *Ann N Y Acad Sci*, 1528(1), 13-28. doi:10.1111/nyas.15057
- Hage, S. R. (2024). Language evolution in primates. *Science*, 385(6710), 713-714. doi:10.1126/science.ado4341
- Hage, S. R., & Nieder, A. (2013). Single neurons in monkey prefrontal cortex encode volitional initiation of vocalizations. *Nat Commun*, 4, 2409. doi:10.1038/ncomms3409
- Hage, S. R., & Nieder, A. (2016). Dual Neural Network Model for the Evolution of Speech and Language. *Trends Neurosci*, 39(12), 813-829. doi:10.1016/j.tins.2016.10.006
- Hainsworth, R. (2014). Cardiovascular control from cardiac and pulmonary vascular receptors. *Exp Physiol*, 99(2), 312-319. doi:10.1113/expphysiol.2013.072637
- Halaney, D. L., Sanyal, A., Nafissi, N. A., Escobedo, D., Goros, M., Michalek, J., . . . Han, H. C. (2017). The Effect of Trabeculae Carneae on Left Ventricular Diastolic Compliance: Improvement in Compliance With Trabecular Cutting. *J Biomech Eng*, 139(3), 0310121-0310128. doi:10.1115/1.4035585
- Han, C., Que, W., Wang, S., Zhang, J., Zhao, J., & Shi, L. (2022). QRS complexes and T waves localization in multi-lead ECG signals based on deep learning and electrophysiology knowledge. *Expert Systems with Applications*, 199. doi:10.1016/j.eswa.2022.117187
- Hirata, S., Nogami, E., & Udono, T. (2024). Measuring heart rate in captive chimpanzees without anesthesia. *Primates*, 65(4), 217-222. doi:10.1007/s10329-024-01131-x
- Honda, M., Komatsu, R., Isobe, T., Tabo, M., & Ishikawa, T. (2013). Involvement of the autonomic nervous system in diurnal variation of corrected QT intervals in common marmosets. *J Pharmacol Sci*, 121(2), 131-137. doi:10.1254/jphs.12230fp

- Huss, M. K., Ikeno, F., Buckmaster, C. L., & Albertelli, M. A. (2015). Echocardiographic and electrocardiographic characteristics of male and female squirrel monkeys (*Saimiri* spp.). *J Am Assoc Lab Anim Sci*, 54(1), 25-28.
- Imanishi, S., Arita, M., Aomine, M., & Kiyosue, T. (1983). Electrocardiogram and His bundle electrogram of Japanese monkeys (*Macaca fuscata*). *Jikken Dobutsu*, 32(4), 167-173. doi:10.1538/expanim1978.32.4_167
- Jammal Salameh, L., Bitzenhofer, S. H., Hanganu-Opatz, I. L., Dutschmann, M., & Egger, V. (2024). Blood pressure pulsations modulate central neuronal activity via mechanosensitive ion channels. *Science*, 383(6682), eadk8511. doi:10.1126/science.adk8511
- Jarvis, E. D. (2019). Evolution of vocal learning and spoken language. *Science*, 366(6461), 50-54. doi:10.1126/science.aax0287
- Jiang, J., Lin, E., & Hanson, D. G. (2000). Vocal fold physiology. *Otolaryngol Clin North Am*, 33(4), 699-718. doi:10.1016/s0030-6665(05)70238-3
- Jorstad, N. L., Close, J., Johansen, N., Yanny, A. M., Barkan, E. R., Travaglini, K. J., . . . Lein, E. S. (2023). Transcriptomic cytoarchitecture reveals principles of human neocortex organization. *Science*, 382(6667), eadf6812. doi:10.1126/science.adf6812
- Jürgens, U. (2009). The neural control of vocalization in mammals: a review. *J Voice*, 23(1), 1-10. doi:10.1016/j.jvoice.2007.07.005
- Kaczmarek, L. D., Behnke, M., Enko, J., Kosakowski, M., Hughes, B. M., Piskorski, J., & Guzik, P. (2019). Effects of emotions on heart rate asymmetry. *Psychophysiology*, 56(4), e13318. doi:10.1111/psyp.13318
- Kawashima, T., Sato, K., Akita, K., & Sasaki, H. (2005). Comparative anatomical study of the autonomic cardiac nervous system in macaque monkeys. *J Morphol*, 266(1), 112-124. doi:10.1002/jmor.10371
- Larsen, R. (2016). *Physiologie des Herzens und des Kreislaufs*. Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-662-50444-4_47
- Lau, O. C., Shen, B., Wong, C. O., Tjong, Y. W., Lo, C. Y., Wang, H. C., . . . Yao, X. (2016). TRPC5 channels participate in pressure-sensing in aortic baroreceptors. *Nat Commun*, 7, 11947. doi:10.1038/ncomms11947
- Levy, M. N. (1997). Neural control of cardiac function. *Baillieres Clin Neurol*, 6(2), 227-244.
- Liao, D. A., Zhang, Y. S., Cai, L. X., & Ghazanfar, A. A. (2018). Internal states and extrinsic factors both determine monkey vocal production. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 115(15), 3978-3983. doi:10.1073/pnas.1722426115
- Linden, W. (1987). A microanalysis of autonomic activity during human speech. *Psychosom Med*, 49(6), 562-578. doi:10.1097/00006842-198711000-00002
- Lisa A., E. M. K. J. J., Higgins; Jacob. O., Wobbrock;. (2021). *An Aligned Rank Transform Procedure for Multifactor Contrast Tests*. Paper presented at the The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Virtual Event, USA.
- Lynch, J. J., Thomas, S. A., Long, J. M., Malinow, K. L., Chickadonz, G., & Katcher, A. H. (1980). Human speech and blood pressure. *J Nerv Ment Dis*, 168(9), 526-534. doi:10.1097/00005053-198009000-00002

- MacNeilage, P. F. (1998). The frame/content theory of evolution of speech production. *Behav Brain Sci*, 21(4), 499-511; discussion 511-446. doi:10.1017/s0140525x98001265
- Malinow, M. R., Hill, J. D., & Ochsner, A. J., 3rd. (1977). Heart rate in caged *Macaca fascicularis*. Effects of short-term physical exercise. *J Med Primatol*, 6(2), 69-75. doi:10.1159/000459725
- Miller, C. T., Freiwald, W. A., Leopold, D. A., Mitchell, J. F., Silva, A. C., & Wang, X. (2016). Marmosets: A Neuroscientific Model of Human Social Behavior. *Neuron*, 90(2), 219-233. doi:10.1016/j.neuron.2016.03.018
- Mitchell, J. F., Reynolds, J. H., & Miller, C. T. (2014). Active vision in marmosets: a model system for visual neuroscience. *J Neurosci*, 34(4), 1183-1194. doi:10.1523/jneurosci.3899-13.2014
- Nishimura, T., Tokuda, I. T., Miyachi, S., Dunn, J. C., Herbst, C. T., Ishimura, K., . . . Fitch, W. T. (2022). Evolutionary loss of complexity in human vocal anatomy as an adaptation for speech. *Science*, 377(6607), 760-763. doi:10.1126/science.abm1574
- Okada, Y., Galbreath, M. M., Shibata, S., Jarvis, S. S., VanGundy, T. B., Meier, R. L., . . . Fu, Q. (2012). Relationship between sympathetic baroreflex sensitivity and arterial stiffness in elderly men and women. *Hypertension*, 59(1), 98-104. doi:10.1161/hypertensionaha.111.176560
- Owren, M. J., Amoss, R. T., & Rendall, D. (2011). Two organizing principles of vocal production: Implications for nonhuman and human primates. *Am J Primatol*, 73(6), 530-544. doi:10.1002/ajp.20913
- Peters, H. F. M. H. (1984). Stuttering and anxiety: The difference between stutterers and nonstutterers in verbal apprehension and physiologic arousal during the anticipation of speech and non-speech tasks. *J. Fluency Disord*, 67-84.
- Pomberger, T., Risueno-Segovia, C., Gultekin, Y. B., Dohmen, D., & Hage, S. R. (2019). Cognitive control of complex motor behavior in marmoset monkeys. *Nat Commun*, 10(1), 3796. doi:10.1038/s41467-019-11714-8
- Pomberger, T., Risueno-Segovia, C., Löschner, J., & Hage, S. R. (2018). Precise Motor Control Enables Rapid Flexibility in Vocal Behavior of Marmoset Monkeys. *Curr Biol*, 28(5), 788-794.e783. doi:10.1016/j.cub.2018.01.070
- Reece, W. O. (2015). *Dukes' Physiology of Domestic Animals* (Vol. 13.).
- Reilly, K. J., & Moore, C. A. (2003). Respiratory sinus arrhythmia during speech production. *J Speech Lang Hear Res*, 46(1), 164-177. doi:10.1044/1092-4388(2003/013)
- Renz-Polster, H., & Krautzig, S. (2013). *Basislehrbuch Innere Medizin : kompakt - greifbar - verständlich* (H. Renz-Polster, S. Krautzig, B. Bätge, & M. Stoll, Trans. 5. Auflage ed.). München: Elsevier, Urban & Fischer.
- Reutersberg, B., Pelisek, J., Ouda, A., de Rougemont, O., Rössler, F., & Zimmermann, A. (2022). Baroreceptors in the Aortic Arch and Their Potential Role in Aortic Dissection and Aneurysms. *J Clin Med*, 11(5). doi:10.3390/jcm11051161
- Rilling, J. K., Glasser, M. F., Preuss, T. M., Ma, X., Zhao, T., Hu, X., & Behrens, T. E. J. (2008). The evolution of the arcuate fasciculus revealed with comparative DTI. *Nature Neuroscience*, 11(4), 426-428. doi:10.1038/nn2072

- Risueno-Segovia, C., Koç, O., Champéroux, P., & Hage, S. R. (2022). Cardiovascular mechanisms underlying vocal behavior in freely moving macaque monkeys. *iScience*, 25(1), 103688. doi:10.1016/j.isci.2021.103688
- Rocchi, F., Oya, H., Balezeau, F., Billig, A. J., Kocsis, Z., Jenison, R. L., . . . Petkov, C. I. (2021). Common fronto-temporal effective connectivity in humans and monkeys. *Neuron*, 109(5), 852-868.e858. doi:10.1016/j.neuron.2020.12.026
- Rosa, L., Silva, Z., Pereira, M., Santos, L., Mitri, F., Carvalho-Barros, R., & Silva, D. (2012). Descriptive anatomic study of the great vessels of the heart in the capuchin monkey *Cebus apella* (Linnaeus, 1758). *Anat Histol Embryol*, 41(6), 469-475. doi:10.1111/j.1439-0264.2012.01163.x
- Schlenker, P., Chemla, E., & Zuberbühler, K. (2016). What Do Monkey Calls Mean? *Trends Cogn Sci*, 20(12), 894-904. doi:10.1016/j.tics.2016.10.004
- Seyfarth, R. M., & Cheney, D. L. (2003). Signalers and receivers in animal communication. *Annu Rev Psychol*, 54, 145-173. doi:10.1146/annurev.psych.54.101601.145121
- Shave, R. E., Lieberman, D. E., Drane, A. L., Brown, M. G., Batterham, A. M., Worthington, S., . . . Baggish, A. L. (2019). Selection of endurance capabilities and the trade-off between pressure and volume in the evolution of the human heart. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 116(40), 19905-19910. doi:10.1073/pnas.1906902116
- Takahashi, D. Y., Narayanan, D. Z., & Ghazanfar, A. A. (2013). Coupled oscillator dynamics of vocal turn-taking in monkeys. *Curr Biol*, 23(21), 2162-2168. doi:10.1016/j.cub.2013.09.005
- Talan, M. I., & Engel, B. T. (1986). Learned control of heart rate during dynamic exercise in nonhuman primates. *J Appl Physiol* (1985), 61(2), 545-553. doi:10.1152/jappl.1986.61.2.545
- Toman, O., Hnatkova, K., Smetana, P., Huster, K. M., Šišáková, M., Barthel, P., . . . Malik, M. (2020). Physiologic heart rate dependency of the PQ interval and its sex differences. *Sci Rep*, 10(1), 2551. doi:10.1038/s41598-020-59480-8
- van der Maarel, L. E., & Christoffels, V. M. (2024). Development of the Cardiac Conduction System. *Adv Exp Med Biol*, 1441, 185-200. doi:10.1007/978-3-031-44087-8_10
- Weber, C. M., & Smith, A. (1990). Autonomic correlates of stuttering and speech assessed in a range of experimental tasks. *J Speech Hear Res*, 33(4), 690-706. doi:10.1044/jshr.3304.690
- Wobbrock, J. O., Findlater, L., Gergle, D., & Higgins, J. J. (2011). The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 143–146. doi:10.1145/1978942.1978963
- Yamaoka, A., Koie, H., Sato, T., Kanayama, K., & Taira, M. (2013). Standard electrocardiographic data of young Japanese monkeys (*Macaca fusucata*). *J Am Assoc Lab Anim Sci*, 52(4), 491-494.
- Zhu, J., Ji, L., & Liu, C. (2019). Heart rate variability monitoring for emotion and disorders of emotion. *Physiol Meas*, 40(6), 064004. doi:10.1088/1361-6579/ab1887

7 Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde im Forschungsbereich der Universitätsklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde in Tübingen unter Betreuung von Prof. Dr. rer. nat. Steffen R. Hage durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte durch Prof. Dr. rer. nat. Steffen R. Hage.

Die Tierversuche wurden im Centre de Recherches Biologiques in Baugy, Frankreich, durchgeführt. Der Versuchsaufbau der vorliegenden Arbeit entspricht einer bereits abgeschlossenen Studie von Cristina Risueno-Segovia und baut auf den Messergebnissen dieser Studie auf.

Die statistische Auswertung erfolgte eigenständig durch mich und nach Anleitung durch Prof. Dr. rer. nat. Steffen R. Hage sowie Cristina Risueno-Segovia.

Ich versichere, das Manuskript selbständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Bad Hersfeld, den 25.03.2026

Paula Handke

8 Danksagung

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Prof. rer. nat. Steffen R. Hage für die Überlassung des Themas sowie für die sehr gute und zuverlässige Betreuung in den letzten Jahren.

Zusätzlich möchte ich Cristina Risueno-Segovia danken, die mich insbesondere zu Beginn der Arbeit stets unterstützt hat.

Ein großer Dank gilt auch meinem Partner Joshua, der mich durch seine Lebensfreude motiviert und glücklich macht.

Abschließend danke ich meinen Geschwistern Max und Martha und vor allem meinen Eltern Thomas und Cornelia, die mich auf meinem Lebensweg unterstützt und mir immer Zuspruch gegeben haben. Ohne Euch wäre ich keine Zahnärztin geworden – ich danke Euch von Herzen!

9 Anhang

9.1 Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 1

Intervallnr.	Herzfrequenz Affe 1		P-Welle Affe 1		PQ-Intervall Affe 1		PQ-Strecke Affe 1	
	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]
1	150,00	161,00	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
2	151,35	159,86	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
3	151,35	159,86	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
4	146,97	159,73	0,06	0,05	0,08	0,08	0,02	0,02
5	149,09	162,32	0,05	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
6	149,09	162,32	0,05	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
7	149,09	162,32	0,05	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
8	150,44	162,56	0,05	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
9	155,81	170,20	0,06	0,05	0,08	0,08	0,02	0,02
10	136,21	147,61	0,06	0,05	0,08	0,08	0,02	0,03
11	136,21	147,61	0,06	0,05	0,08	0,08	0,02	0,03
12	136,21	147,61	0,06	0,05	0,08	0,08	0,02	0,03
13	136,31	149,86	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
14	140,11	154,78	0,06	0,06	0,08	0,08	0,03	0,02
15	140,11	154,78	0,06	0,06	0,08	0,08	0,03	0,02
16	142,71	155,45	0,06	0,06	0,08	0,08	0,03	0,02
17	145,11	155,57	0,05	0,06	0,08	0,08	0,03	0,02
18	147,61	155,80	0,05	0,06	0,08	0,08	0,03	0,02
19	155,09	170,79	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
20	155,09	170,79	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
21	167,65	178,29	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
22	172,29	173,88	0,05	0,05	0,08	0,08	0,02	0,02
23	173,14	169,51	0,05	0,05	0,08	0,08	0,02	0,02
24	173,14	169,51	0,05	0,05	0,08	0,08	0,02	0,02
25	146,31	170,07	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
26	146,31	170,07	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
27	146,31	170,07	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
28	150,01	172,67	0,06	0,06	0,09	0,08	0,02	0,02
29	156,73	168,00	0,05	0,06	0,07	0,08	0,02	0,02
30	156,73	168,00	0,05	0,06	0,07	0,08	0,02	0,02
31	157,80	174,55	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
32	190,78	199,44	0,05	0,06	0,08	0,07	0,02	0,02
33	190,78	199,44	0,05	0,06	0,08	0,07	0,02	0,02
34	166,49	188,95	0,06	0,06	0,09	0,08	0,02	0,02
35	168,43	191,97	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
36	171,24	194,38	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
37	177,85	197,19	0,06	0,05	0,08	0,08	0,02	0,02
38	185,67	198,12	0,06	0,05	0,08	0,08	0,02	0,02
39	197,19	174,05	0,05	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
40	197,56	169,66	0,05	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
41	198,12	163,89	0,05	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
42	186,41	168,72	0,05	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
43	186,41	168,72	0,05	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
44	186,41	168,72	0,05	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
45	186,41	168,72	0,05	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
46	186,41	168,72	0,05	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
47	186,41	168,72	0,05	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
48	155,63	232,51	0,06	0,05	0,08	0,07	0,02	0,02
49	153,71	234,18	0,06	0,05	0,08	0,07	0,02	0,02
50	152,31	229,40	0,06	0,05	0,08	0,07	0,02	0,02
51	228,18	148,31	0,05	0,06	0,07	0,09	0,02	0,03
52	228,18	148,31	0,05	0,06	0,07	0,09	0,02	0,03
53	228,18	148,31	0,05	0,06	0,07	0,09	0,02	0,03
54	228,18	148,31	0,05	0,06	0,07	0,09	0,02	0,03
55	228,18	148,31	0,05	0,06	0,07	0,09	0,02	0,03
56	229,39	146,00	0,05	0,06	0,07	0,09	0,02	0,03
57	231,13	144,15	0,05	0,06	0,07	0,09	0,02	0,03
58	231,13	144,15	0,05	0,06	0,07	0,09	0,02	0,03
59	231,13	144,15	0,05	0,06	0,07	0,09	0,02	0,03
60	231,13	144,15	0,05	0,06	0,07	0,09	0,02	0,03
61	177,56	191,73	0,06	0,07	0,08	0,08	0,02	0,02
62	177,56	191,73	0,06	0,07	0,08	0,08	0,02	0,02
63	178,79	193,82	0,06	0,07	0,08	0,09	0,02	0,02
64	178,79	193,82	0,06	0,07	0,08	0,09	0,02	0,02
65	182,70	197,03	0,06	0,07	0,08	0,09	0,02	0,02
66	184,82	198,13	0,06	0,07	0,08	0,09	0,02	0,02
67	184,82	198,13	0,06	0,07	0,08	0,09	0,02	0,02
68	187,47	198,50	0,06	0,07	0,08	0,09	0,02	0,02
69	196,09	197,96	0,07	0,05	0,09	0,07	0,02	0,02
70	195,36	199,47	0,07	0,05	0,09	0,07	0,02	0,02

71	161,82	173,23	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
72	161,57	177,36	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
73	162,47	181,07	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,02
74	169,27	196,77	0,06	0,07	0,08	0,08	0,02	0,02
75	173,23	199,20	0,06	0,07	0,08	0,08	0,02	0,02
76	207,77	213,21	0,06	0,07	0,08	0,08	0,02	0,01
77	207,77	213,21	0,06	0,07	0,08	0,08	0,02	0,01
78	209,18	213,86	0,07	0,06	0,08	0,08	0,01	0,01
79	210,01	214,74	0,07	0,06	0,08	0,08	0,01	0,01
80	210,01	214,74	0,07	0,06	0,08	0,08	0,01	0,01
81	210,85	215,40	0,07	0,06	0,08	0,08	0,01	0,01
82	211,49	215,62	0,07	0,06	0,08	0,07	0,01	0,01
83	212,13	216,29	0,07	0,06	0,08	0,07	0,01	0,01
84	212,56	217,17	0,07	0,06	0,08	0,07	0,01	0,02
85	213,21	217,62	0,07	0,06	0,08	0,07	0,01	0,02
86	213,21	217,62	0,07	0,06	0,08	0,07	0,01	0,02
87	213,21	217,62	0,07	0,06	0,08	0,07	0,01	0,02
88	213,86	217,85	0,06	0,06	0,08	0,07	0,01	0,02
89	214,74	217,85	0,06	0,05	0,08	0,07	0,01	0,02
90	214,74	217,85	0,06	0,05	0,08	0,07	0,01	0,02
91	214,74	217,85	0,06	0,05	0,08	0,07	0,01	0,02
92	215,40	218,07	0,06	0,05	0,08	0,07	0,01	0,02
93	215,40	218,07	0,06	0,05	0,08	0,07	0,01	0,02

9.2 Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 1

Intervallnr.	QRS-Komplex Affe 1		ST-Strecke Affe 1		QT-Intervall Affe 1		T-Welle Affe 1	
	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]
1	0,05	0,05	0,11	0,11	0,23	0,23	0,07	0,07
2	0,05	0,05	0,11	0,11	0,23	0,23	0,07	0,07
3	0,05	0,05	0,11	0,11	0,23	0,23	0,07	0,07
4	0,05	0,05	0,11	0,11	0,23	0,23	0,07	0,07
5	0,05	0,05	0,11	0,11	0,23	0,23	0,07	0,07
6	0,05	0,05	0,11	0,11	0,23	0,23	0,07	0,07
7	0,05	0,05	0,11	0,11	0,23	0,23	0,07	0,07
8	0,05	0,05	0,11	0,11	0,23	0,23	0,07	0,07
9	0,05	0,05	0,12	0,11	0,22	0,23	0,07	0,07
10	0,05	0,05	0,11	0,11	0,24	0,24	0,08	0,08
11	0,05	0,05	0,11	0,11	0,24	0,24	0,08	0,08
12	0,05	0,05	0,11	0,11	0,24	0,24	0,08	0,08
13	0,05	0,05	0,11	0,11	0,24	0,24	0,08	0,08
14	0,05	0,05	0,11	0,11	0,24	0,24	0,08	0,08
15	0,05	0,05	0,11	0,11	0,24	0,24	0,08	0,08
16	0,05	0,05	0,11	0,11	0,24	0,24	0,08	0,08
17	0,05	0,05	0,11	0,11	0,24	0,24	0,08	0,07
18	0,05	0,05	0,11	0,11	0,24	0,24	0,08	0,07
19	0,05	0,05	0,11	0,11	0,23	0,23	0,08	0,07
20	0,05	0,05	0,11	0,11	0,23	0,23	0,08	0,07
21	0,05	0,05	0,10	0,10	0,23	0,23	0,08	0,08
22	0,05	0,05	0,10	0,10	0,23	0,23	0,07	0,07
23	0,05	0,05	0,11	0,09	0,23	0,22	0,07	0,08
24	0,05	0,05	0,11	0,09	0,23	0,22	0,07	0,08
25	0,05	0,05	0,11	0,11	0,24	0,23	0,08	0,07
26	0,05	0,05	0,11	0,11	0,24	0,23	0,08	0,07
27	0,05	0,05	0,11	0,11	0,24	0,23	0,08	0,07
28	0,05	0,05	0,11	0,11	0,24	0,23	0,08	0,07
29	0,05	0,05	0,10	0,06	0,23	0,23	0,08	0,12
30	0,05	0,05	0,10	0,06	0,23	0,23	0,08	0,12
31	0,05	0,05	0,09	0,05	0,23	0,23	0,09	0,13
32	0,05	0,05	0,05	0,07	0,23	0,23	0,14	0,10
33	0,05	0,05	0,05	0,07	0,24	0,23	0,14	0,10
34	0,05	0,05	0,06	0,06	0,22	0,22	0,11	0,11
35	0,05	0,05	0,06	0,06	0,22	0,22	0,11	0,10
36	0,05	0,05	0,05	0,06	0,22	0,22	0,12	0,10
37	0,05	0,05	0,07	0,06	0,22	0,22	0,10	0,11
38	0,05	0,05	0,06	0,07	0,22	0,25	0,12	0,10
39	0,05	0,05	0,06	0,11	0,22	0,25	0,11	0,09
40	0,05	0,05	0,06	0,10	0,22	0,24	0,11	0,09
41	0,05	0,05	0,07	0,10	0,25	0,22	0,10	0,10
42	0,05	0,05	0,11	0,07	0,26	0,22	0,09	0,10
43	0,05	0,05	0,11	0,07	0,26	0,22	0,09	0,10
44	0,05	0,05	0,11	0,07	0,26	0,22	0,09	0,10
45	0,05	0,05	0,11	0,07	0,26	0,22	0,09	0,10
46	0,05	0,05	0,11	0,07	0,26	0,22	0,09	0,10
47	0,05	0,05	0,11	0,07	0,26	0,22	0,09	0,10
48	0,05	0,05	0,05	0,05	0,23	0,19	0,13	0,09
49	0,05	0,05	0,05	0,05	0,22	0,19	0,12	0,09
50	0,05	0,05	0,05	0,06	0,23	0,19	0,12	0,08
51	0,05	0,05	0,04	0,08	0,20	0,22	0,12	0,08
52	0,05	0,05	0,04	0,08	0,20	0,22	0,12	0,08
53	0,05	0,05	0,04	0,08	0,20	0,22	0,12	0,08
54	0,05	0,05	0,04	0,08	0,20	0,22	0,12	0,08
55	0,05	0,05	0,04	0,08	0,20	0,22	0,12	0,08
56	0,05	0,05	0,05	0,08	0,20	0,22	0,10	0,08
57	0,05	0,05	0,05	0,08	0,19	0,22	0,09	0,08
58	0,05	0,05	0,06	0,08	0,20	0,22	0,09	0,08
59	0,05	0,05	0,05	0,08	0,19	0,22	0,09	0,08
60	0,05	0,05	0,05	0,08	0,19	0,22	0,09	0,08
61	0,05	0,05	0,07	0,07	0,22	0,22	0,09	0,10
62	0,05	0,05	0,07	0,07	0,22	0,22	0,09	0,10
63	0,05	0,05	0,07	0,08	0,22	0,21	0,09	0,09
64	0,05	0,05	0,07	0,08	0,22	0,21	0,09	0,09
65	0,05	0,05	0,07	0,10	0,22	0,22	0,10	0,06
66	0,05	0,05	0,07	0,10	0,22	0,22	0,10	0,07
67	0,05	0,05	0,07	0,10	0,22	0,22	0,10	0,07
68	0,05	0,05	0,07	0,10	0,22	0,21	0,09	0,06
69	0,05	0,05	0,09	0,07	0,21	0,22	0,07	0,11
70	0,05	0,05	0,08	0,08	0,22	0,22	0,08	0,10

71	0,05	0,05	0,07	0,08	0,23	0,22	0,11	0,09
72	0,05	0,05	0,07	0,08	0,23	0,22	0,11	0,09
73	0,05	0,05	0,07	0,07	0,22	0,22	0,11	0,10
74	0,05	0,05	0,08	0,06	0,22	0,21	0,09	0,10
75	0,05	0,05	0,08	0,06	0,22	0,21	0,09	0,10
76	0,05	0,05	0,08	0,08	0,20	0,20	0,07	0,07
77	0,05	0,05	0,08	0,08	0,20	0,20	0,07	0,07
78	0,05	0,05	0,09	0,07	0,20	0,20	0,06	0,08
79	0,05	0,05	0,09	0,07	0,20	0,20	0,06	0,08
80	0,05	0,05	0,09	0,07	0,20	0,20	0,06	0,08
81	0,05	0,05	0,09	0,07	0,20	0,21	0,06	0,08
82	0,05	0,05	0,09	0,07	0,20	0,20	0,06	0,08
83	0,05	0,05	0,09	0,07	0,20	0,20	0,06	0,08
84	0,05	0,05	0,09	0,07	0,20	0,20	0,06	0,08
85	0,05	0,05	0,08	0,08	0,20	0,21	0,07	0,07
86	0,05	0,05	0,08	0,08	0,20	0,21	0,07	0,07
87	0,05	0,05	0,08	0,08	0,20	0,21	0,07	0,07
88	0,05	0,05	0,07	0,09	0,20	0,21	0,08	0,07
89	0,05	0,05	0,07	0,09	0,20	0,20	0,08	0,07
90	0,05	0,05	0,07	0,09	0,20	0,20	0,08	0,07
91	0,05	0,05	0,07	0,09	0,20	0,20	0,08	0,07
92	0,05	0,05	0,07	0,08	0,21	0,20	0,08	0,07
93	0,05	0,05	0,07	0,08	0,21	0,20	0,08	0,07

9.3 Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 2

Intervallnr.	Herzfrequenz Affe 2		P-Welle Affe 2		PQ-Intervall Affe 2		PQ-Strecke Affe 2	
	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]
1	97,13	119,43	0,06	0,06	0,10	0,10	0,04	0,04
2	97,13	119,43	0,06	0,06	0,10	0,10	0,04	0,04
3	97,66	131,31	0,07	0,06	0,11	0,09	0,04	0,03
4	97,66	131,31	0,07	0,05	0,11	0,10	0,04	0,04
5	98,97	137,86	0,07	0,05	0,11	0,09	0,04	0,04
6	98,97	137,86	0,07	0,05	0,11	0,09	0,04	0,04
7	98,97	137,86	0,07	0,05	0,11	0,09	0,04	0,04
8	101,99	150,52	0,06	0,05	0,10	0,09	0,04	0,04
9	101,99	150,52	0,06	0,05	0,10	0,09	0,04	0,04
10	101,99	150,52	0,06	0,05	0,10	0,09	0,04	0,04
11	101,99	150,52	0,06	0,05	0,10	0,09	0,04	0,04
12	104,68	153,68	0,06	0,05	0,10	0,09	0,04	0,04
13	104,68	153,68	0,06	0,05	0,10	0,09	0,04	0,04
14	108,69	155,72	0,06	0,05	0,10	0,08	0,04	0,03
15	108,69	155,72	0,06	0,05	0,10	0,09	0,04	0,04
16	119,43	156,33	0,06	0,05	0,10	0,09	0,04	0,04
17	159,40	153,25	0,07	0,05	0,10	0,09	0,04	0,03
18	143,44	158,64	0,06	0,06	0,10	0,10	0,04	0,04
19	143,44	158,64	0,06	0,06	0,10	0,10	0,04	0,04
20	142,69	161,57	0,06	0,06	0,10	0,09	0,04	0,04
21	155,07	168,54	0,06	0,05	0,10	0,08	0,04	0,04
22	158,64	167,88	0,06	0,05	0,10	0,08	0,04	0,04
23	161,57	167,23	0,06	0,05	0,09	0,08	0,04	0,04
24	161,57	167,23	0,06	0,05	0,09	0,08	0,04	0,04
25	164,14	166,19	0,05	0,05	0,09	0,08	0,04	0,04
26	166,37	165,14	0,05	0,05	0,09	0,08	0,04	0,04
27	166,37	165,14	0,05	0,05	0,09	0,08	0,04	0,04
28	168,01	164,48	0,05	0,05	0,08	0,08	0,04	0,04
29	168,54	163,70	0,05	0,05	0,08	0,08	0,04	0,04
30	168,54	163,17	0,05	0,05	0,08	0,09	0,04	0,04
31	172,99	174,73	0,05	0,05	0,09	0,08	0,03	0,03
32	172,71	175,15	0,05	0,05	0,09	0,08	0,03	0,03
33	172,71	174,59	0,05	0,05	0,09	0,08	0,03	0,03
34	172,56	174,17	0,05	0,05	0,09	0,08	0,03	0,03
35	172,56	174,17	0,05	0,05	0,09	0,08	0,03	0,03
36	157,21	165,10	0,05	0,05	0,09	0,13	0,04	0,08
37	156,85	167,06	0,05	0,05	0,09	0,18	0,04	0,13
38	156,85	167,06	0,05	0,05	0,09	0,13	0,04	0,08
39	165,10	174,44	0,05	0,06	0,13	0,09	0,08	0,04
40	167,06	175,01	0,05	0,06	0,13	0,09	0,08	0,03
41	167,06	175,01	0,05	0,06	0,13	0,09	0,08	0,03
42	168,87	175,44	0,05	0,06	0,14	0,09	0,09	0,03
43	170,62	171,74	0,05	0,06	0,09	0,09	0,04	0,03
44	170,62	171,74	0,05	0,06	0,09	0,09	0,04	0,03
45	169,65	172,43	0,05	0,05	0,09	0,08	0,03	0,03
46	169,65	172,43	0,05	0,05	0,09	0,08	0,03	0,03
47	169,65	172,43	0,05	0,05	0,09	0,08	0,03	0,03
48	169,79	172,99	0,05	0,05	0,09	0,08	0,03	0,03
49	169,79	172,99	0,05	0,05	0,09	0,08	0,03	0,03
50	169,78	173,13	0,06	0,05	0,09	0,08	0,03	0,03
51	163,05	172,06	0,05	0,05	0,09	0,09	0,03	0,03
52	163,83	173,49	0,05	0,05	0,09	0,09	0,03	0,03
53	165,40	177,13	0,05	0,05	0,09	0,09	0,03	0,04
54	165,40	177,13	0,05	0,05	0,09	0,09	0,03	0,03
55	166,87	178,16	0,05	0,05	0,09	0,08	0,03	0,03
56	121,75	131,04	0,07	0,07	0,10	0,11	0,04	0,04
57	122,59	129,91	0,07	0,07	0,10	0,11	0,04	0,04
58	122,59	129,91	0,07	0,07	0,10	0,11	0,04	0,04
59	122,93	129,33	0,07	0,06	0,11	0,10	0,04	0,04
60	122,93	129,33	0,07	0,06	0,11	0,10	0,04	0,04
61	121,11	130,42	0,06	0,06	0,10	0,10	0,04	0,04
62	135,55	145,71	0,07	0,05	0,12	0,09	0,05	0,04
63	135,55	145,71	0,07	0,05	0,12	0,09	0,05	0,04
64	139,52	142,57	0,06	0,06	0,10	0,10	0,04	0,04
65	143,35	139,11	0,06	0,06	0,10	0,10	0,04	0,04
66	107,18	137,17	0,07	0,05	0,11	0,09	0,04	0,04
67	126,38	131,42	0,06	0,06	0,10	0,10	0,04	0,04
68	126,38	131,42	0,06	0,06	0,10	0,10	0,04	0,04
69	126,03	132,97	0,07	0,06	0,10	0,10	0,04	0,04
70	126,89	136,26	0,07	0,06	0,11	0,10	0,04	0,04
71	127,48	138,98	0,07	0,06	0,10	0,10	0,04	0,04
72	127,48	138,98	0,07	0,06	0,10	0,10	0,04	0,04
73	127,48	138,98	0,07	0,06	0,10	0,10	0,04	0,04

9.4 Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 2

Intervallnr.	QRS-Komplex Affe 2		ST-Strecke Affe 2		QT-Intervall Affe 2		T-Welle Affe 2	
	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]
1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,27	0,26	0,17	0,16
2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,27	0,26	0,17	0,16
3	0,05	0,06	0,05	0,04	0,27	0,27	0,17	0,17
4	0,05	0,05	0,05	0,04	0,27	0,26	0,17	0,17
5	0,05	0,05	0,05	0,04	0,27	0,25	0,17	0,17
6	0,05	0,05	0,05	0,04	0,27	0,25	0,17	0,17
7	0,05	0,05	0,05	0,04	0,27	0,25	0,17	0,17
8	0,05	0,05	0,05	0,04	0,27	0,25	0,17	0,16
9	0,05	0,05	0,05	0,04	0,27	0,25	0,17	0,17
10	0,05	0,05	0,05	0,04	0,27	0,25	0,17	0,17
11	0,05	0,05	0,05	0,04	0,27	0,25	0,17	0,17
12	0,05	0,05	0,05	0,03	0,27	0,25	0,17	0,17
13	0,05	0,05	0,05	0,03	0,27	0,25	0,17	0,17
14	0,05	0,06	0,05	0,03	0,27	0,25	0,17	0,17
15	0,05	0,05	0,05	0,03	0,27	0,24	0,17	0,17
16	0,05	0,05	0,05	0,03	0,26	0,21	0,16	0,16
17	0,05	0,05	0,04	0,04	0,25	0,25	0,15	0,15
18	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,24	0,15	0,15
19	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,24	0,15	0,15
20	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,24	0,15	0,15
21	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,24	0,15	0,15
22	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,23	0,15	0,15
23	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,23	0,15	0,15
24	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,23	0,15	0,15
25	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,24	0,15	0,15
26	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,24	0,15	0,15
27	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,24	0,15	0,15
28	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,23	0,15	0,15
29	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,24	0,15	0,15
30	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,24	0,15	0,15
31	0,05	0,05	0,03	0,04	0,24	0,24	0,15	0,15
32	0,05	0,05	0,03	0,04	0,24	0,24	0,16	0,15
33	0,05	0,05	0,03	0,04	0,23	0,24	0,16	0,15
34	0,05	0,05	0,03	0,04	0,23	0,24	0,15	0,15
35	0,05	0,05	0,03	0,04	0,23	0,24	0,15	0,15
36	0,05	0,05	0,03	0,08	0,23	0,27	0,15	0,14
37	0,05	0,00	0,03	0,08	0,23	0,22	0,16	0,14
38	0,05	0,05	0,03	0,08	0,23	0,27	0,16	0,14
39	0,05	0,05	0,08	0,04	0,27	0,22	0,14	0,14
40	0,05	0,05	0,08	0,04	0,27	0,22	0,14	0,14
41	0,05	0,05	0,08	0,04	0,27	0,22	0,14	0,13
42	0,05	0,05	0,10	0,02	0,28	0,22	0,13	0,15
43	0,05	0,05	0,02	0,02	0,22	0,23	0,14	0,16
44	0,05	0,05	0,05	0,05	0,22	0,23	0,11	0,13
45	0,05	0,05	0,05	0,05	0,22	0,22	0,12	0,12
46	0,05	0,05	0,05	0,05	0,22	0,22	0,12	0,12
47	0,05	0,05	0,05	0,05	0,22	0,22	0,12	0,12
48	0,05	0,05	0,05	0,05	0,22	0,22	0,12	0,12
49	0,05	0,05	0,05	0,05	0,22	0,22	0,12	0,12
50	0,05	0,05	0,05	0,05	0,23	0,22	0,12	0,12
51	0,05	0,05	0,02	0,05	0,22	0,23	0,14	0,13
52	0,05	0,05	0,02	0,06	0,22	0,22	0,15	0,12
53	0,05	0,05	0,02	0,09	0,22	0,24	0,15	0,10
54	0,05	0,05	0,02	0,09	0,22	0,22	0,15	0,08
55	0,05	0,05	0,02	0,11	0,22	0,22	0,15	0,06
56	0,05	0,05	0,02	0,02	0,24	0,24	0,16	0,16
57	0,05	0,05	0,02	0,02	0,24	0,24	0,16	0,16
58	0,05	0,05	0,02	0,02	0,24	0,24	0,16	0,16
59	0,05	0,05	0,02	0,03	0,24	0,24	0,16	0,16
60	0,05	0,05	0,02	0,03	0,24	0,24	0,16	0,16
61	0,05	0,05	0,02	0,03	0,24	0,24	0,16	0,16
62	0,05	0,05	0,04	0,04	0,25	0,25	0,16	0,16
63	0,05	0,05	0,04	0,04	0,25	0,25	0,16	0,16
64	0,05	0,05	0,04	0,04	0,25	0,25	0,16	0,15
65	0,05	0,05	0,04	0,04	0,25	0,25	0,16	0,16
66	0,05	0,05	0,04	0,06	0,26	0,26	0,16	0,15
67	0,05	0,05	0,05	0,05	0,26	0,26	0,16	0,16
68	0,05	0,05	0,05	0,05	0,26	0,26	0,16	0,16
69	0,05	0,05	0,02	0,02	0,23	0,23	0,16	0,16
70	0,05	0,05	0,02	0,02	0,23	0,23	0,16	0,16
71	0,05	0,05	0,02	0,02	0,23	0,23	0,16	0,16
72	0,05	0,05	0,02	0,02	0,23	0,23	0,16	0,16
73	0,05	0,05	0,02	0,02	0,23	0,23	0,16	0,16

9.5 Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 3

Intervallnr.	Herzfrequenz Affe 3		P-Welle Affe 3		PQ-Intervall Affe 3		PQ-Strecke Affe 3	
	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]
1	214,48	166,59	0,06	0,08	0,08	0,10	0,02	0,02
2	214,48	166,59	0,06	0,08	0,08	0,10	0,02	0,02
3	214,48	166,59	0,06	0,09	0,08	0,11	0,02	0,02
4	214,48	166,59	0,06	0,08	0,08	0,10	0,02	0,02
5	214,48	166,59	0,06	0,08	0,08	0,10	0,02	0,02
6	214,48	166,59	0,06	0,09	0,09	0,11	0,03	0,02
7	214,48	166,59	0,05	0,09	0,08	0,11	0,02	0,02
8	214,48	166,59	0,04	0,07	0,24	0,09	0,19	0,02
9	145,77	161,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,02	0,02
10	145,77	161,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,02	0,02
11	146,48	163,77	0,07	0,07	0,08	0,09	0,02	0,02
12	146,48	163,77	0,07	0,07	0,08	0,09	0,02	0,02
13	146,48	163,77	0,07	0,07	0,08	0,09	0,02	0,02
14	142,19	160,54	0,06	0,05	0,09	0,07	0,02	0,03
15	146,51	163,71	0,05	0,05	0,08	0,07	0,03	0,02
16	149,71	170,60	0,06	0,07	0,08	0,09	0,02	0,02
17	149,71	170,60	0,06	0,35	0,04	0,08	0,02	0,27
18	149,71	170,60	0,06	0,06	0,08	0,12	0,02	0,06
19	150,76	171,01	0,06	0,08	0,08	0,09	0,02	0,02
20	151,82	171,29	0,07	0,06	0,11	0,08	0,03	0,02
21	151,82	171,29	0,06	0,07	0,08	0,08	0,02	0,02
22	152,48	171,85	0,07	0,06	0,09	0,08	0,02	0,02
23	152,48	171,85	0,07	0,06	0,09	0,34	0,02	0,28
24	152,48	171,85	0,08	0,06	0,10	0,08	0,01	0,02
25	169,10	172,43	0,07	0,07	0,08	0,13	0,02	0,06
26	169,10	172,43	0,08	0,08	0,10	0,10	0,02	0,02
27	171,01	176,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,02	0,02
28	171,29	165,77	0,07	0,08	0,09	0,10	0,02	0,02
29	171,29	165,77	0,06	0,09	0,02	0,12	0,08	0,03
30	171,29	165,77	0,07	0,07	0,09	1,06	0,02	0,99
31	171,85	166,66	0,07	0,07	0,09	1,06	0,02	0,99
32	172,43	167,10	0,07	0,09	0,10	0,12	0,02	0,03
33	182,43	173,18	0,07	0,07	0,09	0,08	0,02	0,02
34	183,10	174,48	0,07	0,07	0,08	0,08	0,02	0,02
35	183,50	176,38	0,06	0,07	0,08	0,09	0,02	0,02
36	184,69	178,02	0,05	0,06	0,07	0,07	0,02	0,02
37	184,69	178,02	0,06	0,07	0,08	0,09	0,02	0,02
38	169,93	179,56	0,06	0,07	0,08	0,08	0,02	0,02
39	170,77	181,26	0,06	0,07	0,08	0,08	0,02	0,02
40	178,02	176,20	0,07	0,08	0,09	0,10	0,02	0,02
41	179,56	177,57	0,07	0,08	0,09	0,10	0,02	0,02
42	179,56	177,57	0,07	0,08	0,09	0,10	0,02	0,02
43	179,56	177,57	0,07	0,08	0,09	0,10	0,02	0,02
44	181,26	178,78	0,07	0,08	0,08	0,10	0,02	0,02
45	181,26	178,78	0,07	0,08	0,09	0,10	0,02	0,02
46	182,84	180,38	0,07	0,08	0,08	0,10	0,02	0,02
47	182,84	180,38	0,07	0,08	0,08	0,10	0,02	0,02
48	182,84	180,38	0,07	0,08	0,08	0,10	0,02	0,02
49	171,04	195,01	0,08	0,06	0,11	0,08	0,02	0,01
50	171,04	195,01	0,08	0,06	0,11	0,08	0,02	0,01
51	171,04	195,01	0,08	0,06	0,11	0,08	0,02	0,01
52	171,04	195,01	0,08	0,06	0,11	0,08	0,02	0,01
53	215,25	181,74	0,06	0,05	0,07	0,07	0,01	0,02
54	166,82	225,27	0,06	0,06	0,08	0,07	0,02	0,01
55	182,80	188,54	0,07	0,06	0,09	0,11	0,02	0,05
56	182,80	188,54	0,07	0,06	0,09	0,08	0,02	0,02
57	184,88	190,26	0,08	0,05	0,09	0,10	0,02	0,05
58	184,88	190,26	0,08	0,06	0,09	0,08	0,02	0,02
59	185,36	191,81	0,08	0,06	0,09	0,08	0,02	0,02
60	214,01	165,71	0,06	0,07	0,07	0,08	0,02	0,02
61	208,77	169,76	0,05	0,07	0,07	0,08	0,02	0,01
62	175,67	172,13	0,06	0,06	0,08	0,08	0,02	0,01
63	153,65	147,89	0,06	0,06	0,09	0,08	0,02	0,02

9.6 Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 3

Intervallnr.	QRS-Komplex Affe 3		ST-Strecke Affe 3		QT-Intervall Affe 3		T-Welle Affe 3	
	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]
1	0,05	0,05	0,02	0,04	0,20	0,23	0,14	0,14
2	0,05	0,05	0,02	0,04	0,20	0,23	0,14	0,14
3	0,05	0,05	0,02	0,03	0,20	0,23	0,14	0,14
4	0,05	0,05	0,02	0,03	0,20	0,23	0,14	0,15
5	0,06	0,05	0,02	0,03	0,21	0,23	0,13	0,14
6	0,05	0,05	0,02	0,03	0,20	0,23	0,13	0,14
7	0,06	0,05	0,02	0,03	0,21	0,23	0,14	0,14
8	0,05	0,05	0,02	0,03	0,20	0,24	0,14	0,15
9	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,24	0,15	0,15
10	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,24	0,15	0,15
11	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,23	0,15	0,15
12	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,23	0,15	0,15
13	0,05	0,05	0,04	0,04	0,24	0,23	0,15	0,15
14	0,05	0,05	0,03	0,02	0,24	0,23	0,16	0,16
15	0,05	0,05	0,03	0,02	0,24	0,23	0,16	0,16
16	0,05	0,05	0,13	0,03	0,34	0,22	0,16	0,14
17	0,14	0,05	0,09	0,03	0,38	0,23	0,16	0,15
18	0,05	0,05	0,13	0,02	0,34	0,23	0,16	0,16
19	0,05	0,05	0,13	0,02	0,34	0,23	0,17	0,16
20	0,05	0,05	0,13	0,02	0,33	0,23	0,16	0,16
21	0,05	0,05	0,13	0,02	0,34	0,23	0,16	0,16
22	0,05	0,05	0,14	0,02	0,23	0,23	0,15	0,16
23	0,05	0,02	0,12	0,02	0,23	0,34	0,16	0,16
24	0,05	0,05	0,12	0,02	0,23	0,23	0,16	0,16
25	0,05	0,05	0,02	0,01	0,23	0,23	0,15	0,16
26	0,05	0,05	0,02	0,01	0,23	0,20	0,15	0,14
27	0,05	0,05	0,02	0,02	0,22	0,23	0,16	0,16
28	0,05	0,05	0,02	0,02	0,23	0,23	0,16	0,16
29	0,05	0,05	0,01	0,02	0,23	0,23	0,15	0,15
30	0,05	0,05	0,01	0,02	0,23	0,23	0,16	0,16
31	0,05	0,05	0,02	0,02	0,22	0,23	0,16	0,15
32	0,05	0,05	0,01	0,03	0,22	0,23	0,16	0,15
33	0,05	0,05	0,02	0,03	0,21	0,23	0,14	0,15
34	0,05	0,05	0,03	0,03	0,21	0,23	0,13	0,15
35	0,05	0,05	0,03	0,03	0,21	0,23	0,13	0,15
36	0,07	0,09	0,03	0,03	0,25	0,24	0,12	0,13
37	0,05	0,05	0,03	0,03	0,23	0,23	0,13	0,15
38	0,05	0,05	0,03	0,03	0,23	0,21	0,14	0,13
39	0,05	0,05	0,03	0,03	0,23	0,23	0,14	0,15
40	0,05	0,05	0,03	0,03	0,23	0,23	0,15	0,15
41	0,05	0,05	0,03	0,03	0,23	0,23	0,15	0,15
42	0,05	0,05	0,03	0,03	0,23	0,23	0,15	0,15
43	0,05	0,05	0,03	0,03	0,23	0,23	0,15	0,15
44	0,05	0,05	0,03	0,03	0,23	0,23	0,15	0,15
45	0,05	0,05	0,03	0,03	0,23	0,23	0,15	0,15
46	0,05	0,05	0,03	0,03	0,23	0,23	0,15	0,15
47	0,05	0,05	0,03	0,03	0,23	0,23	0,15	0,16
48	0,05	0,05	0,03	0,03	0,23	0,23	0,15	0,15
49	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,23	0,15	0,15
50	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,23	0,15	0,15
51	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,23	0,15	0,15
52	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,23	0,15	0,15
53	0,06	0,05	0,02	0,02	0,19	0,21	0,11	0,15
54	0,05	0,06	0,02	0,02	0,22	0,19	0,15	0,11
55	0,05	0,05	0,02	0,01	0,22	0,20	0,14	0,14
56	0,05	0,05	0,02	0,01	0,22	0,20	0,14	0,14
57	0,05	0,05	0,02	0,01	0,21	0,20	0,14	0,15
58	0,05	0,05	0,02	0,01	0,21	0,21	0,14	0,15
59	0,05	0,05	0,02	0,01	0,21	0,21	0,14	0,15
60	0,06	0,05	0,02	0,02	0,19	0,23	0,11	0,16
61	0,06	0,05	0,02	0,03	0,22	0,23	0,11	0,15
62	0,05	0,05	0,02	0,03	0,22	0,23	0,13	0,15
63	0,05	0,05	0,02	0,03	0,23	0,23	0,15	0,15

9.7 Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 4

Intervallnr.	Herzfrequenz Affe 4		P-Welle Affe 4		PQ-Intervall Affe 4		PQ-Strecke Affe 4	
	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]
1	96,25	119,55	0,03	0,03	0,10	0,09	0,07	0,06
2	97,64	122,04	0,03	0,03	0,10	0,10	0,07	0,06
3	97,64	122,04	0,03	0,03	0,10	0,10	0,07	0,06
4	99,66	124,62	0,03	0,03	0,10	0,10	0,06	0,06
5	99,66	124,62	0,03	0,03	0,10	0,10	0,06	0,06
6	99,66	124,62	0,03	0,03	0,10	0,10	0,06	0,06
7	102,05	126,37	0,03	0,03	0,09	0,10	0,06	0,06
8	102,05	126,37	0,03	0,03	0,09	0,10	0,06	0,06
9	102,05	126,37	0,03	0,03	0,09	0,10	0,06	0,06
10	104,36	127,59	0,03	0,03	0,09	0,10	0,06	0,06
11	104,36	127,59	0,03	0,03	0,09	0,10	0,06	0,06
12	104,36	127,59	0,03	0,03	0,09	0,10	0,06	0,06
13	108,80	127,59	0,03	0,03	0,09	0,10	0,06	0,06
14	114,56	124,24	0,03	0,03	0,09	0,10	0,06	0,07
15	121,95	139,09	0,03	0,05	0,07	0,11	0,04	0,06
16	123,71	141,86	0,03	0,05	0,08	0,11	0,04	0,06
17	130,08	129,31	0,07	0,05	0,15	0,12	0,08	0,07
18	138,55	139,25	0,05	0,05	0,06	0,16	0,01	0,11
19	138,55	139,25	0,05	0,05	0,11	0,10	0,06	0,05
20	128,44	150,57	0,04	0,05	0,11	0,10	0,06	0,05
21	128,44	150,57	0,04	0,05	0,11	0,10	0,06	0,05
22	129,31	151,30	0,05	0,05	0,11	0,10	0,06	0,05
23	119,11	121,22	0,03	0,03	0,10	0,10	0,07	0,07
24	118,55	122,86	0,03	0,03	0,10	0,10	0,07	0,07
25	117,19	126,94	0,03	0,03	0,10	0,10	0,07	0,07
26	117,19	126,94	0,03	0,03	0,10	0,10	0,07	0,07
27	117,33	128,19	0,03	0,03	0,10	0,10	0,07	0,07
28	117,33	128,19	0,03	0,03	0,10	0,10	0,07	0,07
29	117,33	128,19	0,03	0,03	0,10	0,10	0,07	0,07
30	131,02	127,08	0,03	0,03	0,10	0,10	0,07	0,07
31	131,02	127,08	0,03	0,03	0,10	0,10	0,07	0,07
32	147,89	148,31	0,05	0,05	0,10	0,10	0,05	0,05
33	142,91	145,89	0,04	0,05	0,10	0,11	0,06	0,06
34	144,20	147,23	0,04	0,06	0,10	0,11	0,06	0,05
35	144,20	147,23	0,04	0,06	0,10	0,11	0,06	0,05
36	145,17	149,37	0,05	0,06	0,10	0,11	0,06	0,05
37	145,26	152,54	0,05	0,07	0,10	0,11	0,06	0,05
38	145,89	163,49	0,05	0,07	0,11	0,12	0,06	0,05
39	147,23	165,02	0,06	0,07	0,11	0,12	0,05	0,05
40	161,02	154,10	0,06	0,06	0,11	0,11	0,05	0,04
41	156,71	154,55	0,06	0,06	0,11	0,11	0,05	0,05
42	153,64	151,69	0,06	0,05	0,10	0,11	0,05	0,06
43	154,44	145,57	0,05	0,04	0,10	0,10	0,05	0,06
44	151,69	146,12	0,05	0,04	0,11	0,10	0,06	0,06
45	151,69	146,12	0,05	0,04	0,11	0,10	0,06	0,06
46	146,12	149,94	0,04	0,03	0,10	0,21	0,06	0,17
47	146,12	149,94	0,04	0,03	0,10	0,21	0,06	0,17
48	152,61	160,20	0,04	0,07	0,17	0,12	0,13	0,05
49	152,61	160,20	0,04	0,07	0,17	0,12	0,13	0,05
50	152,61	160,20	0,04	0,07	0,17	0,12	0,13	0,05
51	153,97	160,44	0,05	0,07	0,18	0,11	0,13	0,05
52	153,97	160,44	0,05	0,07	0,18	0,11	0,13	0,05
53	153,97	160,44	0,05	0,07	0,18	0,11	0,13	0,05
54	155,54	160,93	0,05	0,07	0,18	0,11	0,13	0,04
55	162,83	165,92	0,07	0,07	0,11	0,11	0,04	0,05
56	164,09	167,67	0,08	0,06	0,12	0,11	0,04	0,05
57	171,18	167,89	0,06	0,06	0,11	0,10	0,05	0,04
58	171,18	167,89	0,06	0,06	0,11	0,10	0,05	0,04
59	171,31	166,19	0,06	0,06	0,11	0,10	0,05	0,05
60	170,76	163,76	0,06	0,06	0,11	0,11	0,04	0,05
61	163,76	155,52	0,06	0,05	0,11	0,10	0,05	0,05
62	162,24	154,07	0,06	0,05	0,11	0,10	0,05	0,05
63	161,00	152,96	0,06	0,04	0,11	0,10	0,05	0,06
64	131,88	147,31	0,03	0,04	0,10	0,10	0,06	0,06
65	133,59	148,29	0,03	0,05	0,10	0,11	0,07	0,06
66	157,82	145,42	0,06	0,05	0,12	0,11	0,06	0,06
67	157,82	145,42	0,06	0,05	0,12	0,11	0,06	0,06
68	128,97	144,64	0,03	0,05	0,10	0,11	0,07	0,06
69	125,84	155,18	0,04	0,06	0,10	0,12	0,07	0,05
70	147,34	121,88	0,05	0,03	0,11	0,10	0,06	0,07

71		132,05	147,81		0,03	0,03		0,16	0,11		0,13	0,08
72		121,88	165,26		0,03	0,03		0,16	0,13		0,13	0,10
73		142,92	143,53		0,03	0,03		0,11	0,11		0,08	0,08
74		137,41	150,01		0,05	0,05		0,11	0,11		0,07	0,05
75		133,40	131,99		0,03	0,03		0,11	0,10		0,07	0,07
76		133,40	131,99		0,03	0,03		0,11	0,10		0,07	0,07
77		134,12	138,97		0,04	0,04		0,11	0,10		0,07	0,07
78		147,27	137,15		0,04	0,04		0,11	0,11		0,07	0,07
79		146,90	150,67		0,04	0,05		0,10	0,10		0,06	0,05
80		146,90	150,67		0,04	0,05		0,10	0,10		0,06	0,05
81		147,51	150,88		0,05	0,04		0,10	0,10		0,05	0,06
82		147,51	150,88		0,05	0,04		0,10	0,10		0,05	0,06
83		147,93	150,67		0,05	0,04		0,11	0,10		0,06	0,06
84		147,93	150,67		0,05	0,04		0,11	0,10		0,06	0,06
85		148,90	147,69		0,05	0,04		0,10	0,11		0,06	0,06
86		148,90	147,69		0,05	0,04		0,10	0,11		0,06	0,06
87		148,90	147,69		0,05	0,04		0,10	0,11		0,06	0,06
88		149,44	146,94		0,05	0,04		0,10	0,11		0,05	0,06
89		149,44	146,94		0,05	0,04		0,10	0,11		0,05	0,06
90		146,51	148,88		0,05	0,04		0,11	0,14		0,06	0,10
91		142,81	144,97		0,04	0,03		0,11	0,08		0,07	0,06
92		142,81	144,97		0,04	0,05		0,11	0,11		0,07	0,06
93		142,04	146,68		0,04	0,06		0,11	0,11		0,07	0,06
94		142,04	146,68		0,04	0,06		0,11	0,11		0,07	0,06
95		141,46	148,98		0,04	0,06		0,11	0,11		0,07	0,05
96		141,46	148,98		0,04	0,06		0,11	0,11		0,07	0,05
97		141,46	148,98		0,04	0,06		0,11	0,11		0,07	0,05
98		141,46	148,98		0,04	0,06		0,11	0,11		0,07	0,05
99		141,27	151,32		0,04	0,06		0,11	0,11		0,06	0,05
100		147,72	140,31		0,04	0,03		0,14	0,14		0,10	0,11
101		148,22	138,86		0,04	0,03		0,14	0,14		0,10	0,11
102		147,32	138,86		0,04	0,04		0,18	0,10		0,14	0,07
103		145,73	139,95		0,04	0,04		0,18	0,10		0,14	0,07
104		143,82	140,49		0,04	0,04		0,18	0,10		0,14	0,07
105		143,82	140,49		0,04	0,04		0,18	0,10		0,14	0,07
106		143,82	140,49		0,04	0,04		0,18	0,10		0,14	0,07
107		133,46	146,52		0,04	0,05		0,10	0,11		0,06	0,06
108		133,46	146,52		0,04	0,05		0,10	0,11		0,06	0,06
109		133,46	146,52		0,04	0,05		0,10	0,11		0,06	0,06
110		135,09	148,10		0,04	0,05		0,10	0,11		0,06	0,06
111		135,09	148,10		0,04	0,05		0,10	0,11		0,06	0,06
112		135,84	149,78		0,05	0,05		0,10	0,11		0,06	0,06

9.8 Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 4

Intervallnr.	QRS-Komplex Affe 4		ST-Strecke Affe 4		QT-Intervall Affe 4		T-Welle Affe 4	
	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]
1	0,05	0,05	0,06	0,06	0,27	0,27	0,16	0,16
2	0,05	0,05	0,06	0,06	0,27	0,27	0,16	0,16
3	0,05	0,05	0,06	0,06	0,27	0,27	0,16	0,16
4	0,05	0,05	0,06	0,06	0,27	0,27	0,16	0,16
5	0,05	0,05	0,06	0,06	0,27	0,27	0,16	0,16
6	0,05	0,05	0,06	0,06	0,27	0,27	0,16	0,16
7	0,05	0,05	0,06	0,06	0,27	0,27	0,16	0,16
8	0,05	0,05	0,06	0,06	0,27	0,27	0,16	0,16
9	0,05	0,05	0,06	0,06	0,27	0,27	0,16	0,16
10	0,05	0,05	0,06	0,06	0,27	0,27	0,16	0,16
11	0,05	0,05	0,06	0,06	0,27	0,27	0,16	0,16
12	0,05	0,05	0,06	0,06	0,27	0,27	0,16	0,16
13	0,05	0,05	0,06	0,05	0,27	0,26	0,16	0,16
14	0,05	0,05	0,06	0,05	0,27	0,26	0,16	0,16
15	0,08	0,05	0,04	0,04	0,27	0,25	0,16	0,16
16	0,08	0,05	0,04	0,04	0,27	0,25	0,16	0,15
17	0,05	0,11	0,08	0,04	0,25	0,30	0,14	0,15
18	0,10	0,06	0,03	0,03	0,30	0,25	0,16	0,16
19	0,05	0,06	0,04	0,08	0,28	0,25	0,15	0,14
20	0,05	0,06	0,09	0,03	0,28	0,25	0,14	0,16
21	0,05	0,06	0,09	0,03	0,28	0,25	0,14	0,16
22	0,05	0,06	0,09	0,03	0,28	0,24	0,14	0,16
23	0,05	0,05	0,05	0,05	0,26	0,26	0,16	0,16
24	0,05	0,05	0,05	0,05	0,26	0,26	0,16	0,16
25	0,05	0,05	0,05	0,05	0,26	0,26	0,16	0,16
26	0,05	0,05	0,05	0,05	0,26	0,26	0,16	0,16
27	0,05	0,05	0,05	0,05	0,26	0,26	0,16	0,16
28	0,05	0,05	0,05	0,05	0,26	0,26	0,16	0,16
29	0,05	0,05	0,05	0,05	0,26	0,26	0,16	0,16
30	0,05	0,05	0,05	0,05	0,26	0,26	0,15	0,16
31	0,05	0,05	0,05	0,05	0,26	0,26	0,15	0,16
32	0,06	0,07	0,04	0,04	0,27	0,27	0,16	0,16
33	0,05	0,06	0,04	0,04	0,25	0,25	0,15	0,15
34	0,05	0,06	0,04	0,04	0,25	0,26	0,15	0,15
35	0,05	0,06	0,04	0,04	0,25	0,26	0,15	0,15
36	0,05	0,06	0,04	0,04	0,25	0,26	0,15	0,16
37	0,05	0,06	0,04	0,04	0,25	0,25	0,15	0,16
38	0,06	0,06	0,04	0,04	0,25	0,25	0,15	0,16
39	0,06	0,05	0,04	0,04	0,26	0,25	0,15	0,15
40	0,05	0,06	0,04	0,04	0,25	0,25	0,15	0,15
41	0,06	0,06	0,04	0,04	0,25	0,25	0,15	0,15
42	0,06	0,06	0,04	0,04	0,25	0,24	0,15	0,15
43	0,06	0,05	0,04	0,04	0,25	0,25	0,15	0,15
44	0,06	0,05	0,04	0,04	0,24	0,25	0,15	0,16
45	0,06	0,05	0,04	0,04	0,24	0,25	0,15	0,16
46	0,05	0,06	0,04	0,04	0,25	0,25	0,16	0,16
47	0,05	0,06	0,04	0,04	0,25	0,25	0,16	0,16
48	0,06	0,05	0,03	0,03	0,25	0,24	0,15	0,15
49	0,06	0,05	0,03	0,03	0,25	0,24	0,15	0,15
50	0,06	0,05	0,03	0,03	0,25	0,24	0,15	0,15
51	0,06	0,06	0,03	0,03	0,24	0,24	0,15	0,15
52	0,06	0,06	0,03	0,03	0,24	0,24	0,15	0,15
53	0,06	0,06	0,03	0,03	0,24	0,24	0,15	0,15
54	0,06	0,06	0,03	0,03	0,24	0,24	0,15	0,15
55	0,06	0,06	0,03	0,03	0,25	0,24	0,16	0,15
56	0,06	0,06	0,03	0,03	0,25	0,24	0,16	0,15
57	0,06	0,06	0,03	0,03	0,24	0,25	0,15	0,15
58	0,06	0,06	0,03	0,03	0,24	0,25	0,15	0,15
59	0,06	0,06	0,03	0,03	0,24	0,25	0,15	0,15
60	0,06	0,06	0,03	0,03	0,24	0,25	0,15	0,16
61	0,06	0,05	0,03	0,03	0,25	0,24	0,16	0,16
62	0,06	0,05	0,03	0,03	0,25	0,24	0,16	0,16
63	0,06	0,05	0,03	0,03	0,25	0,24	0,16	0,16
64	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,24	0,16	0,16
65	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,24	0,16	0,16
66	0,05	0,05	0,02	0,03	0,24	0,24	0,16	0,16
67	0,05	0,05	0,02	0,03	0,24	0,24	0,16	0,16
68	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,23	0,16	0,15
69	0,05	0,05	0,03	0,02	0,24	0,23	0,16	0,16
70	0,05	0,05	0,03	0,08	0,26	0,26	0,16	0,15

71		0,05	0,05		0,05	0,06		0,26	0,26		0,15	0,15
72		0,05	0,05		0,08	0,04		0,26	0,23		0,15	0,14
73		0,05	0,05		0,06	0,04		0,26	0,24		0,15	0,14
74		0,05	0,05		0,03	0,03		0,24	0,23		0,15	0,15
75		0,05	0,05		0,03	0,03		0,24	0,23		0,15	0,15
76		0,05	0,05		0,03	0,03		0,24	0,23		0,15	0,15
77		0,05	0,05		0,03	0,03		0,24	0,24		0,15	0,15
78		0,05	0,05		0,03	0,03		0,24	0,24		0,15	0,15
79		0,06	0,05		0,03	0,03		0,23	0,24		0,15	0,15
80		0,06	0,05		0,03	0,03		0,23	0,24		0,15	0,15
81		0,06	0,05		0,03	0,03		0,24	0,23		0,15	0,15
82		0,06	0,05		0,03	0,03		0,24	0,23		0,15	0,15
83		0,05	0,05		0,03	0,03		0,23	0,24		0,15	0,15
84		0,05	0,05		0,03	0,03		0,23	0,24		0,15	0,15
85		0,05	0,05		0,03	0,03		0,23	0,24		0,15	0,15
86		0,05	0,05		0,03	0,03		0,23	0,24		0,15	0,15
87		0,05	0,05		0,03	0,03		0,23	0,24		0,15	0,15
88		0,05	0,05		0,03	0,03		0,23	0,24		0,15	0,15
89		0,05	0,05		0,03	0,03		0,23	0,24		0,15	0,15
90		0,05	0,05		0,03	0,03		0,24	0,24		0,16	0,15
91		0,05	0,06		0,03	0,03		0,23	0,24		0,15	0,15
92		0,05	0,06		0,03	0,03		0,23	0,24		0,15	0,15
93		0,05	0,06		0,03	0,03		0,23	0,24		0,15	0,15
94		0,05	0,06		0,03	0,03		0,23	0,23		0,15	0,15
95		0,05	0,06		0,03	0,03		0,23	0,24		0,15	0,15
96		0,05	0,06		0,03	0,03		0,23	0,24		0,15	0,15
97		0,05	0,06		0,03	0,03		0,23	0,24		0,15	0,15
98		0,05	0,06		0,03	0,03		0,23	0,22		0,15	0,13
99		0,05	0,06		0,03	0,03		0,24	0,24		0,15	0,15
100		0,05	0,05		0,03	0,03		0,23	0,24		0,15	0,15
101		0,05	0,05		0,03	0,03		0,24	0,24		0,15	0,15
102		0,06	0,05		0,03	0,03		0,24	0,23		0,15	0,15
103		0,05	0,05		0,03	0,03		0,24	0,23		0,15	0,15
104		0,05	0,05		0,03	0,03		0,24	0,23		0,15	0,15
105		0,05	0,05		0,03	0,03		0,24	0,23		0,15	0,15
106		0,05	0,05		0,03	0,03		0,24	0,23		0,15	0,15
107		0,06	0,05		0,04	0,04		0,25	0,25		0,15	0,15
108		0,06	0,05		0,04	0,04		0,25	0,25		0,15	0,15
109		0,06	0,05		0,04	0,04		0,25	0,25		0,15	0,15
110		0,06	0,05		0,04	0,04		0,25	0,24		0,15	0,15
111		0,06	0,05		0,04	0,04		0,25	0,24		0,15	0,15
112		0,06	0,05		0,04	0,04		0,25	0,24		0,15	0,15

9.9 Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 5

Intervallnr.	Herzfrequenz Affe 5		P-Welle Affe 5		PQ-Intervall Affe 5		PQ-Strecke Affe 5	
	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]
1	182,12	153,38	0,04	0,04	0,11	0,18	0,07	0,14
2	182,65	154,80	0,03	0,05	0,01	0,12	0,04	0,06
3	165,76	175,75	0,06	0,07	0,12	0,09	0,06	0,02
4	150,41	171,33	0,07	0,07	0,10	0,09	0,03	0,02
5	153,23	173,80	0,07	0,07	0,10	0,09	0,03	0,02
6	139,78	146,42	0,07	0,07	0,09	0,09	0,02	0,02
7	139,78	146,42	0,07	0,07	0,09	0,09	0,02	0,02
8	139,78	146,42	0,07	0,07	0,09	0,09	0,02	0,02
9	139,78	146,42	0,07	0,07	0,09	0,09	0,02	0,02
10	139,97	147,65	0,07	0,07	0,09	0,09	0,02	0,03
11	126,30	140,44	0,06	0,04	0,08	0,07	0,02	0,02
12	134,72	129,89	0,07	0,06	0,09	0,08	0,02	0,02
13	134,72	129,89	0,07	0,06	0,09	0,08	0,02	0,02
14	133,94	127,88	0,06	0,07	0,08	0,09	0,02	0,02
15	132,29	126,15	0,05	0,07	0,07	0,09	0,02	0,02
16	131,15	126,00	0,05	0,07	0,07	0,09	0,02	0,02
17	127,88	126,35	0,07	0,07	0,09	0,09	0,02	0,02
18	127,88	126,35	0,07	0,07	0,09	0,09	0,02	0,02
19	127,12	126,87	0,07	0,07	0,09	0,09	0,02	0,02
20	126,15	126,56	0,07	0,07	0,09	0,09	0,02	0,02
21	125,57	127,76	0,07	0,07	0,09	0,09	0,02	0,02
22	152,75	139,65	0,06	0,07	0,09	0,10	0,02	0,03
23	147,09	156,13	0,07	0,07	0,09	0,09	0,02	0,03
24	147,09	156,13	0,07	0,07	0,09	0,09	0,02	0,03
25	146,47	159,24	0,07	0,07	0,09	0,09	0,02	0,03
26	148,87	142,26	0,07	0,06	0,09	0,08	0,02	0,02
27	139,94	150,11	0,07	0,06	0,09	0,10	0,02	0,04
28	139,94	150,11	0,07	0,06	0,09	0,10	0,02	0,04
29	139,94	150,11	0,07	0,06	0,09	0,10	0,02	0,04
30	138,90	153,32	0,07	0,06	0,11	0,09	0,04	0,02
31	138,90	153,32	0,07	0,06	0,11	0,09	0,04	0,02
32	138,90	153,32	0,07	0,06	0,11	0,09	0,04	0,02
33	138,90	153,32	0,07	0,06	0,11	0,09	0,04	0,02
34	138,90	153,32	0,07	0,06	0,11	0,09	0,04	0,02
35	138,90	153,32	0,07	0,06	0,11	0,09	0,04	0,02
36	138,90	153,32	0,07	0,06	0,11	0,09	0,04	0,02
37	139,47	135,22	0,07	0,05	0,09	0,08	0,02	0,02
38	139,47	135,22	0,07	0,05	0,09	0,08	0,02	0,02
39	127,72	122,04	0,06	0,05	0,09	0,07	0,02	0,02
40	132,96	121,49	0,06	0,05	0,09	0,08	0,02	0,02
41	119,67	123,08	0,05	0,05	0,07	0,07	0,02	0,02
42	119,67	123,08	0,05	0,05	0,07	0,07	0,02	0,02
43	119,31	123,37	0,05	0,05	0,08	0,07	0,02	0,02
44	119,31	123,37	0,05	0,05	0,08	0,07	0,02	0,02
45	123,08	126,15	0,05	0,05	0,07	0,08	0,02	0,02
46	123,08	126,15	0,05	0,05	0,07	0,08	0,02	0,02
47	123,37	126,52	0,05	0,05	0,07	0,07	0,02	0,02
48	126,15	141,67	0,05	0,05	0,08	0,07	0,02	0,02
49	140,44	140,21	0,04	0,05	0,07	0,08	0,02	0,02
50	143,58	145,03	0,06	0,06	0,08	0,09	0,02	0,02
51	143,58	145,03	0,06	0,07	0,08	0,09	0,02	0,02
52	143,58	145,03	0,06	0,06	0,08	0,09	0,02	0,02
53	139,89	137,59	0,05	0,07	0,08	0,09	0,02	0,02
54	137,95	136,86	0,07	0,07	0,09	0,10	0,02	0,02
55	135,79	131,15	0,07	0,05	0,10	0,07	0,02	0,02

9.10 Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 5

Intervallnr.	QRS-Komplex Affe 5		ST-Strecke Affe 5		QT-Intervall Affe 5		T-Welle Affe 5	
	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]
1	0,09	0,09	0,01	0,03	0,18	0,22	0,09	0,08
2	0,25	0,13	0,01	0,03	0,30	0,28	0,07	0,10
3	0,05	0,05	0,02	0,02	0,22	0,22	0,16	0,16
4	0,05	0,05	0,02	0,02	0,23	0,22	0,16	0,15
5	0,05	0,05	0,02	0,02	0,23	0,22	0,16	0,15
6	0,05	0,05	0,02	0,02	0,24	0,23	0,17	0,17
7	0,05	0,05	0,02	0,02	0,24	0,23	0,17	0,17
8	0,05	0,05	0,02	0,02	0,24	0,23	0,17	0,17
9	0,05	0,05	0,02	0,02	0,24	0,23	0,17	0,17
10	0,05	0,05	0,02	0,02	0,24	0,23	0,17	0,17
11	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,23	0,16	0,16
12	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,24	0,17	0,17
13	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,24	0,17	0,17
14	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,24	0,17	0,17
15	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,24	0,17	0,17
16	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,25	0,17	0,17
17	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,25	0,17	0,17
18	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,25	0,17	0,17
19	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,25	0,17	0,17
20	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,25	0,17	0,17
21	0,05	0,05	0,03	0,03	0,25	0,25	0,17	0,17
22	0,05	0,05	0,02	0,02	0,23	0,24	0,16	0,17
23	0,05	0,05	0,02	0,02	0,24	0,24	0,17	0,17
24	0,05	0,05	0,02	0,02	0,24	0,24	0,17	0,17
25	0,05	0,05	0,02	0,02	0,24	0,23	0,17	0,17
26	0,05	0,05	0,02	0,02	0,23	0,23	0,16	0,16
27	0,05	0,05	0,02	0,03	0,24	0,23	0,17	0,16
28	0,05	0,05	0,02	0,03	0,24	0,23	0,17	0,16
29	0,05	0,05	0,02	0,03	0,24	0,23	0,17	0,16
30	0,05	0,05	0,03	0,02	0,24	0,23	0,16	0,16
31	0,05	0,05	0,03	0,02	0,24	0,23	0,16	0,16
32	0,05	0,05	0,03	0,02	0,24	0,23	0,16	0,16
33	0,05	0,05	0,03	0,02	0,24	0,23	0,16	0,16
34	0,05	0,05	0,03	0,02	0,24	0,23	0,16	0,16
35	0,05	0,05	0,03	0,02	0,24	0,23	0,16	0,16
36	0,05	0,05	0,03	0,02	0,24	0,23	0,16	0,16
37	0,05	0,05	0,02	0,02	0,24	0,23	0,17	0,17
38	0,05	0,05	0,02	0,02	0,24	0,23	0,17	0,17
39	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,25	0,17	0,17
40	0,05	0,05	0,02	0,03	0,23	0,24	0,16	0,17
41	0,05	0,05	0,03	0,03	0,25	0,24	0,17	0,17
42	0,05	0,05	0,03	0,03	0,25	0,24	0,17	0,17
43	0,05	0,05	0,03	0,03	0,25	0,24	0,17	0,16
44	0,05	0,05	0,03	0,03	0,25	0,24	0,17	0,16
45	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,24	0,17	0,17
46	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,24	0,17	0,17
47	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,24	0,16	0,17
48	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,23	0,17	0,16
49	0,05	0,05	0,03	0,02	0,23	0,22	0,16	0,15
50	0,05	0,05	0,03	0,02	0,22	0,24	0,16	0,15
51	0,05	0,05	0,03	0,02	0,22	0,24	0,16	0,15
52	0,05	0,05	0,03	0,02	0,22	0,24	0,16	0,15
53	0,05	0,05	0,02	0,03	0,22	0,24	0,15	0,17
54	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,24	0,16	0,16
55	0,05	0,05	0,03	0,03	0,24	0,24	0,17	0,17

9.11 Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 6

	Herzfrequenz Affe 6		P-Welle Affe 6		PQ-Intervall Affe 6		PQ-Strecke Affe 6	
Intervallnr.	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]
1	144,47	137,08	0,06	0,07	0,08	0,08	0,01	0,01
2	127,58	129,92	0,07	0,07	0,08	0,08	0,01	0,01
3	128,08	131,19	0,07	0,07	0,08	0,08	0,01	0,01
4	89,70	105,83	0,08	0,07	0,00	0,15	0,08	0,08
5	84,73	116,49	0,08	0,07	0,05	0,12	0,03	0,05
6	84,73	116,49	0,08	0,07	0,05	0,12	0,03	0,05
7	130,57	130,72	0,07	0,07	0,08	0,08	0,01	0,01
8	130,57	130,72	0,07	0,07	0,08	0,08	0,01	0,01
9	130,17	132,34	0,07	0,07	0,08	0,08	0,01	0,01
10	130,17	132,34	0,07	0,07	0,08	0,08	0,01	0,01
11	130,17	132,34	0,07	0,07	0,08	0,08	0,01	0,01
12	130,17	132,34	0,07	0,07	0,08	0,08	0,01	0,01
13	129,51	140,49	0,07	0,07	0,08	0,08	0,01	0,01
14	129,49	146,63	0,07	0,06	0,08	0,08	0,01	0,01
15	129,49	146,63	0,07	0,07	0,08	0,08	0,01	0,01
16	129,49	148,08	0,07	0,06	0,08	0,08	0,01	0,01
17	129,49	148,08	0,07	0,07	0,08	0,08	0,01	0,01
18	130,72	148,90	0,07	0,06	0,08	0,08	0,01	0,01
19	81,14	120,79	0,08	0,07	0,22	0,09	0,14	0,02
20	88,54	119,73	0,08	0,08	0,19	0,09	0,11	0,01
21	88,54	119,73	0,08	0,08	0,19	0,09	0,11	0,01
22	117,47	125,12	0,08	0,08	0,09	0,09	0,01	0,01
23	125,36	114,79	0,07	0,07	0,09	0,08	0,01	0,01
24	122,01	115,98	0,07	0,07	0,09	0,08	0,01	0,01
25	139,29	136,55	0,07	0,07	0,08	0,08	0,01	0,02
26	136,55	139,66	0,07	0,07	0,08	0,04	0,02	0,04
27	136,80	144,03	0,06	0,07	0,08	0,03	0,02	0,04
28	136,80	144,03	0,06	0,07	0,08	0,03	0,02	0,04
29	137,33	147,36	0,06	0,07	0,08	0,03	0,02	0,04
30	137,33	147,36	0,06	0,07	0,08	0,03	0,02	0,04
31	137,72	149,92	0,06	0,07	0,03	0,08	0,03	0,01
32	137,72	149,92	0,06	0,07	0,03	0,08	0,03	0,01
33	128,57	142,71	0,07	0,07	0,12	0,10	0,05	0,03
34	115,01	157,56	0,07	0,07	0,14	0,08	0,07	0,01
35	114,90	159,16	0,07	0,07	0,14	0,08	0,07	0,01
36	125,25	127,10	0,06	0,07	0,13	0,09	0,06	0,01
37	124,62	126,93	0,06	0,07	0,13	0,09	0,06	0,01
38	127,10	127,96	0,07	0,07	0,02	0,08	0,05	0,01
39	122,42	123,40	0,08	0,07	0,09	0,08	0,01	0,01
40	119,47	127,20	0,08	0,07	0,09	0,08	0,01	0,01
41	119,47	127,20	0,08	0,07	0,09	0,08	0,01	0,01
42	119,47	127,20	0,08	0,07	0,09	0,08	0,01	0,01
43	117,71	131,42	0,08	0,07	0,09	0,03	0,01	0,04
44	117,71	131,42	0,08	0,07	0,09	0,03	0,01	0,04
45	120,26	141,83	0,08	0,07	0,09	0,03	0,01	0,04
46	132,55	133,33	0,07	0,07	0,08	0,09	0,01	0,01
47	127,91	135,56	0,07	0,07	0,09	0,08	0,01	0,01
48	127,91	135,56	0,07	0,07	0,09	0,08	0,01	0,01
49	127,26	133,27	0,07	0,07	0,09	0,09	0,01	0,01
50	123,86	130,85	0,08	0,07	0,09	0,08	0,01	0,01
51	123,86	130,85	0,08	0,07	0,09	0,08	0,01	0,01
52	134,92	169,01	0,07	0,06	0,08	0,08	0,01	0,02
53	138,96	173,50	0,07	0,06	0,08	0,08	0,01	0,02
54	138,96	173,50	0,07	0,06	0,08	0,08	0,01	0,02
55	139,89	145,02	0,07	0,08	0,08	0,11	0,01	0,04
56	139,89	145,02	0,07	0,08	0,08	0,11	0,01	0,04
57	141,51	146,33	0,06	0,08	0,08	0,11	0,01	0,03
58	141,51	146,33	0,06	0,08	0,08	0,11	0,01	0,03
59	132,77	157,24	0,08	0,06	0,12	0,08	0,04	0,01
60	136,52	155,87	0,08	0,06	0,12	0,08	0,04	0,01
61	136,52	155,87	0,08	0,06	0,11	0,08	0,04	0,01
62	150,55	138,53	0,06	0,07	0,08	0,08	0,02	0,01
63	149,59	135,55	0,06	0,07	0,08	0,08	0,02	0,01
64	149,59	135,55	0,06	0,07	0,08	0,08	0,02	0,01
65	149,59	135,55	0,06	0,07	0,08	0,08	0,02	0,01
66	149,06	130,95	0,06	0,08	0,08	0,09	0,01	0,01
67	149,06	130,95	0,06	0,08	0,08	0,09	0,01	0,01
68	147,79	128,90	0,07	0,08	0,08	0,09	0,01	0,01
69	139,48	132,71	0,07	0,08	0,08	0,09	0,01	0,01
70	139,13	131,80	0,07	0,07	0,09	0,08	0,01	0,01

71	139,13	131,80	0,07	0,07	0,09	0,08	0,01	0,01
72	138,59	131,29	0,07	0,08	0,09	0,09	0,01	0,01
73	129,94	133,33	0,08	0,07	0,09	0,08	0,01	0,01
74	130,11	133,24	0,08	0,07	0,09	0,08	0,01	0,01
75	130,30	128,56	0,07	0,07	0,08	0,09	0,01	0,01
76	132,64	126,30	0,07	0,07	0,08	0,09	0,01	0,01
77	138,31	127,33	0,07	0,08	0,09	0,12	0,01	0,04
78	138,31	127,33	0,07	0,08	0,09	0,12	0,01	0,04
79	138,31	127,33	0,07	0,08	0,09	0,12	0,01	0,04
80	133,88	132,07	0,06	0,10	0,08	0,15	0,02	0,05
81	133,88	132,07	0,06	0,10	0,08	0,15	0,02	0,05
82	133,88	132,07	0,06	0,10	0,08	0,15	0,02	0,05
83	128,95	149,01	0,10	0,07	0,15	0,08	0,06	0,01
84	143,72	129,35	0,07	0,07	0,08	0,08	0,01	0,01
85	143,72	129,35	0,07	0,07	0,08	0,08	0,01	0,01
86	126,87	119,08	0,07	0,08	0,08	0,09	0,01	0,01
87	125,67	118,29	0,07	0,08	0,08	0,09	0,01	0,01
88	122,19	118,52	0,07	0,08	0,08	0,09	0,01	0,01
89	134,60	143,34	0,07	0,07	0,09	0,08	0,01	0,01
90	136,03	137,51	0,07	0,07	0,08	0,08	0,01	0,01

9.12 Mittelwerte der einzelnen Parameter in den Zeitintervallen [-2;0] und [0;2] Affe 6

Intervallnr.	QRS-Komplex Affe 6		ST-Strecke Affe 6		QT-Intervall Affe 6		T-Welle Affe 6	
	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]	[-2;0]	[0;2]
1	0,05	0,05	0,00	0,00	0,25	0,25	0,20	0,19
2	0,05	0,05	0,01	0,01	0,25	0,25	0,19	0,20
3	0,05	0,05	0,01	0,00	0,25	0,25	0,19	0,20
4	0,23	0,05	0,29	0,14	0,71	0,30	0,13	0,15
5	0,20	0,05	0,32	0,07	0,63	0,30	0,12	0,18
6	0,20	0,05	0,32	0,07	0,63	0,30	0,12	0,18
7	0,05	0,05	0,00	0,00	0,25	0,25	0,20	0,20
8	0,05	0,05	0,00	0,00	0,25	0,25	0,20	0,20
9	0,05	0,05	0,01	0,00	0,25	0,24	0,19	0,20
10	0,05	0,05	0,01	0,00	0,25	0,24	0,19	0,20
11	0,05	0,05	0,01	0,00	0,25	0,24	0,19	0,20
12	0,05	0,05	0,01	0,00	0,25	0,24	0,19	0,20
13	0,05	0,05	0,01	0,00	0,25	0,23	0,20	0,18
14	0,05	0,05	0,01	0,00	0,25	0,24	0,19	0,18
15	0,05	0,05	0,01	0,00	0,25	0,24	0,19	0,18
16	0,05	0,05	0,01	0,00	0,25	0,24	0,19	0,18
17	0,05	0,05	0,01	0,00	0,25	0,24	0,19	0,18
18	0,05	0,05	0,00	0,00	0,25	0,24	0,20	0,18
19	0,05	0,05	0,25	0,00	0,33	0,25	0,16	0,20
20	0,05	0,05	0,20	0,00	0,31	0,25	0,17	0,20
21	0,05	0,05	0,20	0,00	0,31	0,25	0,17	0,20
22	0,05	0,05	0,01	0,01	0,25	0,25	0,19	0,19
23	0,05	0,05	0,01	0,01	0,25	0,26	0,19	0,20
24	0,05	0,05	0,01	0,01	0,25	0,26	0,20	0,20
25	0,05	0,05	0,01	0,01	0,25	0,25	0,20	0,20
26	0,05	0,10	0,01	0,06	0,25	0,35	0,20	0,19
27	0,05	0,10	0,01	0,06	0,25	0,35	0,20	0,19
28	0,05	0,10	0,01	0,06	0,25	0,35	0,20	0,19
29	0,05	0,10	0,01	0,06	0,25	0,35	0,20	0,19
30	0,05	0,10	0,01	0,06	0,25	0,35	0,20	0,19
31	0,10	0,05	0,01	0,06	0,36	0,25	0,20	0,19
32	0,10	0,05	0,01	0,06	0,36	0,25	0,20	0,19
33	0,05	0,05	0,10	0,04	0,34	0,25	0,15	0,19
34	0,05	0,05	0,14	0,01	0,34	0,24	0,15	0,19
35	0,05	0,05	0,14	0,01	0,34	0,24	0,15	0,19
36	0,05	0,05	0,12	0,01	0,36	0,24	0,19	0,19
37	0,05	0,05	0,12	0,01	0,36	0,24	0,19	0,19
38	0,11	0,05	0,01	0,01	0,30	0,25	0,19	0,19
39	0,05	0,05	0,01	0,01	0,25	0,25	0,19	0,19
40	0,05	0,05	0,01	0,01	0,25	0,25	0,19	0,19
41	0,05	0,05	0,01	0,01	0,25	0,25	0,19	0,19
42	0,05	0,05	0,01	0,01	0,25	0,25	0,19	0,19
43	0,05	0,10	0,01	0,01	0,25	0,30	0,19	0,19
44	0,05	0,10	0,01	0,01	0,25	0,30	0,19	0,19
45	0,05	0,10	0,01	0,01	0,25	0,29	0,19	0,19
46	0,05	0,05	0,01	0,01	0,25	0,25	0,19	0,20
47	0,05	0,05	0,01	0,01	0,25	0,25	0,19	0,19
48	0,05	0,05	0,01	0,01	0,25	0,25	0,19	0,19
49	0,05	0,05	0,01	0,01	0,25	0,25	0,20	0,19
50	0,05	0,05	0,01	0,01	0,25	0,25	0,20	0,19
51	0,05	0,05	0,01	0,01	0,25	0,25	0,20	0,19
52	0,05	0,05	0,01	0,00	0,25	0,21	0,19	0,17
53	0,05	0,05	0,01	0,00	0,25	0,19	0,19	0,14
54	0,05	0,05	0,01	0,00	0,25	0,21	0,19	0,16
55	0,05	0,05	0,00	0,06	0,25	0,27	0,20	0,16
56	0,05	0,05	0,00	0,06	0,25	0,27	0,20	0,16
57	0,05	0,05	0,00	0,06	0,28	0,24	0,20	0,16
58	0,05	0,05	0,00	0,06	0,28	0,24	0,20	0,16
59	0,05	0,05	0,05	0,01	0,27	0,24	0,17	0,18
60	0,05	0,05	0,05	0,01	0,27	0,24	0,17	0,19
61	0,05	0,05	0,05	0,01	0,27	0,24	0,17	0,19
62	0,05	0,05	0,01	0,01	0,24	0,24	0,19	0,19
63	0,05	0,05	0,01	0,01	0,24	0,24	0,19	0,19
64	0,05	0,05	0,01	0,01	0,24	0,24	0,19	0,19
65	0,05	0,05	0,01	0,01	0,24	0,24	0,19	0,19
66	0,05	0,05	0,01	0,01	0,24	0,25	0,19	0,19
67	0,05	0,05	0,01	0,01	0,24	0,25	0,19	0,19
68	0,05	0,05	0,01	0,01	0,24	0,25	0,19	0,19
69	0,05	0,05	0,00	0,00	0,25	0,25	0,19	0,19
70	0,05	0,05	0,01	0,00	0,25	0,25	0,19	0,19

71	0,05	0,05		0,01	0,00		0,25	0,25		0,19	0,19
72	0,05	0,05		0,01	0,00		0,24	0,25		0,19	0,20
73	0,05	0,05		0,00	0,00		0,25	0,25		0,20	0,19
74	0,05	0,05		0,00	0,00		0,25	0,25		0,20	0,19
75	0,05	0,05		0,00	0,01		0,25	0,25		0,20	0,20
76	0,05	0,05		0,00	0,01		0,25	0,25		0,20	0,20
77	0,05	0,05		0,01	0,12		0,30	0,28		0,19	0,17
78	0,05	0,05		0,01	0,12		0,30	0,28		0,19	0,17
79	0,05	0,05		0,01	0,12		0,30	0,28		0,19	0,17
80	0,05	0,05		0,06	0,11		0,34	0,27		0,20	0,14
81	0,05	0,05		0,06	0,11		0,34	0,27		0,20	0,14
82	0,05	0,05		0,06	0,11		0,34	0,27		0,20	0,14
83	0,05	0,05		0,11	0,01		0,30	0,24		0,15	0,19
84	0,05	0,05		0,01	0,00		0,24	0,25		0,19	0,20
85	0,05	0,05		0,01	0,00		0,24	0,25		0,19	0,20
86	0,05	0,05		0,00	0,00		0,25	0,25		0,20	0,20
87	0,05	0,05		0,00	0,00		0,25	0,25		0,20	0,20
88	0,05	0,05		0,00	0,00		0,25	0,25		0,20	0,20
89	0,05	0,05		0,01	0,01		0,24	0,25		0,19	0,19
90	0,05	0,05		0,01	0,01		0,25	0,24		0,19	0,19

9.13 Grafische Gegenüberstellung der Herzfrequenz von Mittelwert, SEM und STD im Zeitintervall [-5;5]

Herzfrequenz in (bpm)
Mittelwerte

Herzfrequenz in (bpm)
SEM

Herzfrequenz in (bpm)
STD

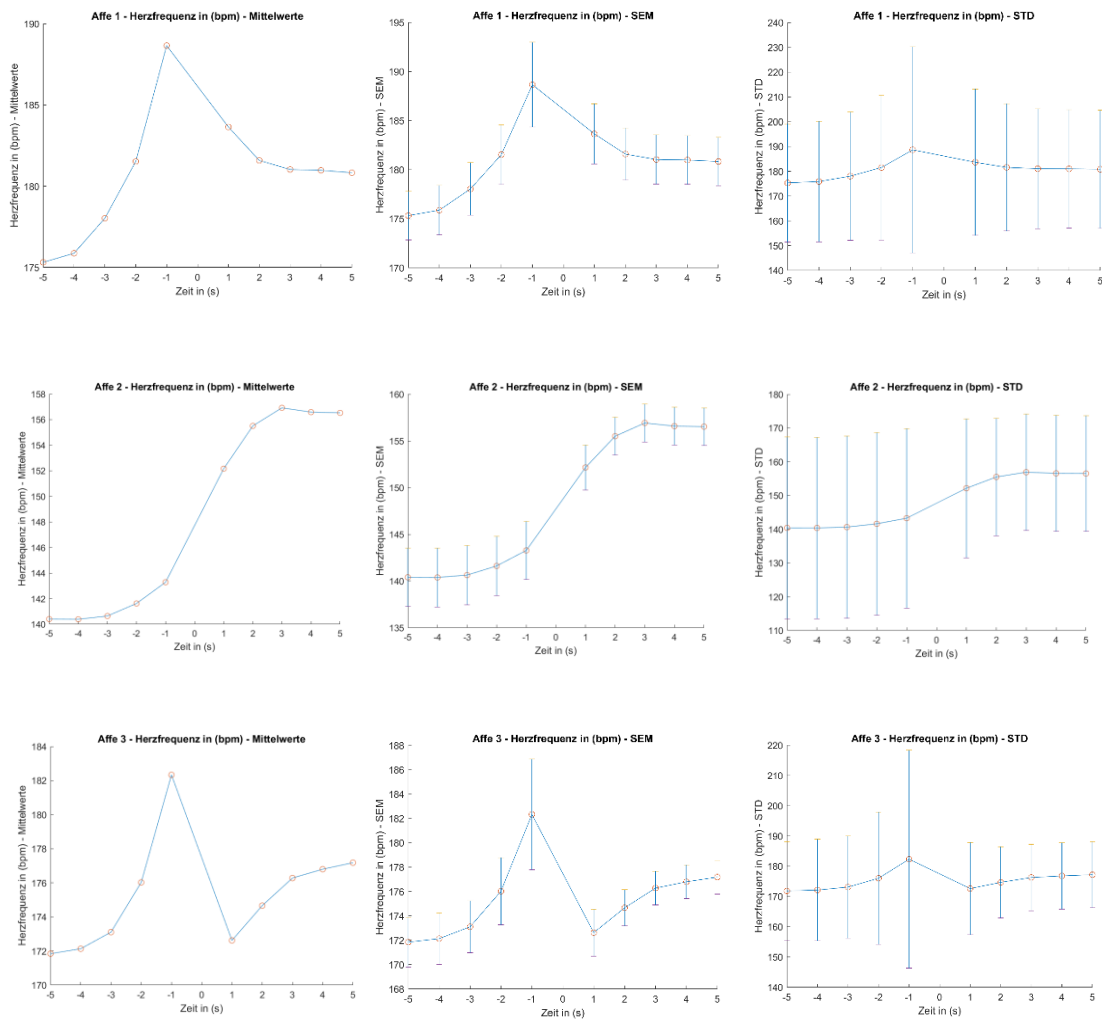


Abbildung 13: Grafische Gegenüberstellung der Herzfrequenz von Mittelwert, SEM und STD im Zeitintervall [-5;5]

Herzfrequenz in (bpm)
Mittelwerte

Herzfrequenz in (bpm)
SEM

Herzfrequenz in (bpm)
STD

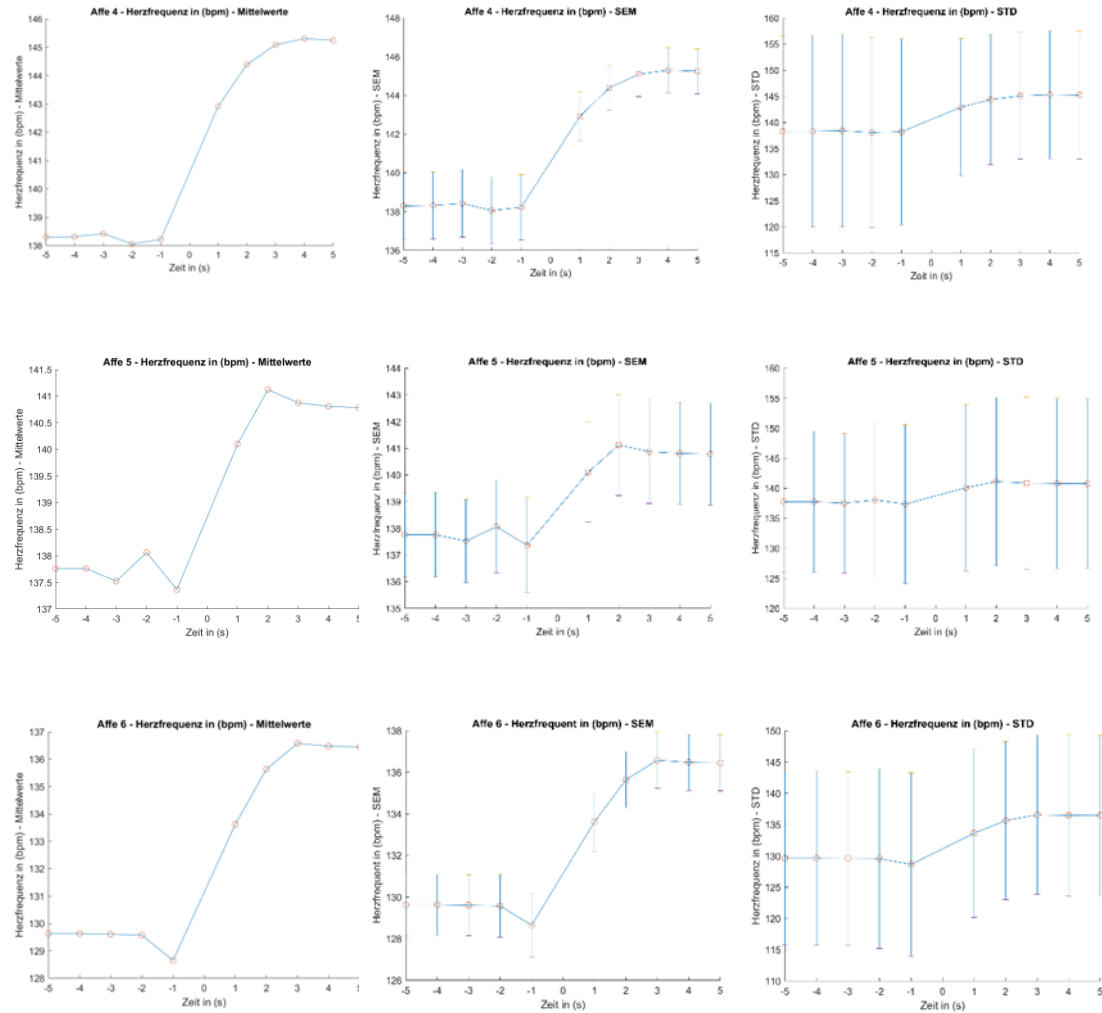


Abbildung 14: Grafische Gegenüberstellung der Herzfrequenz von Mittelwert, SEM und STD im Zeitintervall [-5;5]